

LEBENSDAUERVORHERSAGE VON ERMÜDUNGSBEANSPRUCHTEN STAHLTRAGWERKEN MIT HILFE VON MONITORING UND BEGLEITENDEN VERSUCHEN

Vom Fachbereich für Bauingenieurwesen der
Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von

Milad Mehdiانpour

aus Behshahr

Eingereicht am 08.03.2002

Mündliche Prüfung am 06.12.2002

Vorsitz Prof. em. Dr.-Ing. J. Scheer

Hauptreferent Prof. Dr.-Ing. U. Peil

Koreferent Prof. Dr.-Ing. T. Seeger

Prüfer Prof. Dr.-Ing. H. Budelmann

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Stahlbau der Technischen Universität Braunschweig.

Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Peil danke ich herzlichst für seine stets freundliche, außerordentlich lehrreiche und motivierende Betreuung. In zahlreichen interessanten Diskussionen habe ich wertvolle Anregungen zu meiner Dissertation und der darin angewandten Methodik aufnehmen dürfen.

Den Mitgliedern der Prüfungskommission möchte ich für ihre Tätigkeit Dank sagen, insbesondere Herrn Prof. Dr.-Ing. T. Seeger für sein freundliches Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferates.

Meinen Freunden Dipl.-Ing. Matthias Behrens und Dipl.-Ing. Rüdiger Scharff danke ich für die immerwährende Diskussionsbereitschaft und das angenehme und konstruktive Arbeitsklima.

Ebenso sei den Kollegen aus dem Labor, insbesondere Herrn Andreas Honisch und Herrn Stephan Amelung, für ihre tatkräftige und freundschaftliche Unterstützung recht herzlich gedankt.

Mein Dank gilt außerdem allen wissenschaftlichen Hilfskräften, die mich bei der Durchführung von Messungen und Versuchen unterstützt haben.

Die Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des SFB 477 an der Technischen Universität Braunschweig finanziell gefördert.

Braunschweig, im Januar 2003

Milad Mehdiانpour

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Nomenclatur	IV
1 Einleitung	1
1.1 Notwendigkeit der Untersuchungen	1
1.2 Ziele der Arbeit	2
2 Methoden der Lebensdauerbestimmung	3
2.1 Das Phänomen der Werkstoffermüdung	3
2.1.1 Allgemeines	3
2.1.2 Stadien der Bruchentstehung	5
2.2 Rechnerische Methoden der Lebensdauerermittlung	6
2.2.1 Notwendigkeit	6
2.2.2 Nennspannungskonzept und verwandte Methoden	6
2.2.3 Örtliches Konzept (Kerbgrund- bzw. Kerbdehnungskonzept)	9
2.2.4 Bruchmechanisches Konzept (Rissfortschrittskonzept)	10
2.2.5 Kritik der modellbasierten Lebensdauerermittlung	10
2.3 Probabilistische Methode der Lebensdauerermittlung	13
2.4 Experimentelle Methode der Lebensdauerermittlung	15
3 Experimentelle Lebensdauervorhersage für Bauwerke	17
3.1 Generelle Vorgehensweise	17
3.2 Anforderungen an die Vorgehensweise	19
3.2.1 Identifizierung der kritischen Details	19
3.2.2 Beanspruchungs-Zeit-Funktion	19
3.2.3 Möglichkeiten der Trenderfassung	21
3.2.4 Proben der kritischen Details	24
3.2.5 Validierung durch Ersatzbauwerke	24
4 Ermittlung synthetischer Beanspruchungszeitreihen	27
4.1 Allgemeines	27
4.2 Datenerfassung durch in-situ Messungen	27
4.2.1 Beschreibung der Messeinrichtung	27
4.2.2 Autobahnbrücke Braunschweig-Wenden	28
4.2.3 Eisenbahnbrücke Sülfeld bei Wolfsburg	30
4.3 Datenauswertung	33
4.3.1 Allgemeines	33
4.3.2 Grundzüge der Clusteranalyse und Diskriminanzanalyse	34

4.3.2.1	Allgemeines	34
4.3.2.2	Clusteranalyse	36
4.3.2.3	Diskriminanzanalyse	37
4.3.3	Kennwerte zur Generierung synthetischer Beanspruchungszeitreihen	39
4.3.3.1	Clustermatrix	39
4.3.3.2	Mehrstufige Übergangsmatrizen	44
4.3.3.3	Verteilung der Fahrzeuggesamtwichte	45
4.3.3.4	Zeitreihen von identifizierten Fahrzeugen	47
4.3.3.5	Verteilung der Zeitlücken zwischen Fahrzeugen	52
4.3.3.6	Typische Reihenfolgen von Fahrzeugen	53
4.3.3.7	Reihenfolgen der Umkehrpunkte	54
4.4	Generierung synthetischer Beanspruchungszeitreihen	54
4.4.1	Vorgehensweise bei neuen Bauwerken	54
4.4.1.1	Generelle Betrachtung	54
4.4.1.2	Generierung auf Grundlage der Übergangsmatrix	55
4.4.1.3	Automatische Selektion	56
4.4.1.4	Generierung auf Grundlage der mehrstufigen Übergangsmatrix	57
4.4.1.5	Generierung mit Hilfe des Snake-Algorithmus	60
4.4.1.6	Bewertung der Generierungsmethoden	63
4.4.2	Vorgehensweise bei bestehenden Bauwerken	64
4.5	Validierung synthetischer Beanspruchungszeitreihen	67
4.5.1	Versuchskonzept	67
4.5.2	Probenform und Probenwerkstoff	69
4.5.3	Beanspruchungszeitreihe	71
4.5.4	Ergebnis	75
4.5.5	Bewertung der Validierung synthetischer Beanspruchungszeitreihen	78
5	Experimentelle Lebensdauerermittlung	83
5.1	Allgemeines	83
5.2	Versuchsaufbau	83
5.3	Schadensdefinition und Schadenserfassung	84
5.4	Untersuchte Beanspruchungsformen	85
5.5	Werkstoff	86
5.6	Versuchskörper	87
5.6.1	Ersatzbauwerk	87
5.6.1.1	Aussparungsecken	89
5.6.1.2	Schweißverbindung im Untergurt	89
5.6.1.3	Steifenanschlüsse	89

5.6.2	Proben der kritischen Details	89
5.6.2.1	Aussparungsecken	89
5.6.2.2	Schweißverbindung im Untergurt	91
5.6.2.3	Steifenanschlüsse	92
5.7	Versuchsdurchführung	93
5.7.1	Versuchsreihenbezeichnung	93
5.7.2	Aussparungsecken	94
5.7.3	Schweißverbindung im Untergurt	98
5.7.4	Steifenanschlüsse	101
5.8	Bisherige Ergebnisse	101
5.8.1	Aussparungsecken	101
5.8.2	Schweißverbindung im Untergurt	103
5.8.3	Steifenanschlüsse	104
5.8.4	Rechnerischer Vergleich	105
6	Zusammenfassung	109
6.1	Bewertung der Ergebnisse	109
6.2	Ausblick	111
Literatur	115
Normen und Richtlinien	125
Anlagen	127

Nomenclatur

α_k	Kerbformzahl
β	Sicherheitsindex
δ	Rissspitzenverschiebung
d	Abstand zweier Umkehrpunkte (ganzzahlig)
D	Zuordnungsregel
D^*	die optimale Zuordnungsregel
D	Schadenssumme
D_i	Teilschädigung einer Kollektivstufe
DMS	Dehnungsmessstreifen
E	Elastizitätsmodul
ε_a	Dehnungsamplitude
$\Delta\varepsilon$	Doppelamplitude der Dehnung
$\overline{\varepsilon_o}$	Mittelwert der Oberdehnung
F_u	unteres Kraftniveau
F_o	oberes Kraftniveau
F_{min}	Kraftniveau der untersten Kollektivstufe
F_{max}	Kraftniveau der obersten Kollektivstufe
f_R	Dichtefunktion der Beanspruchbarkeit
f_S	Dichtefunktion der Beanspruchung
G	Gruppenvariable, welche die Gruppenzugehörigkeit kennzeichnet
$H_{i,j}$	Element der Zeile i und der Spalte j der Übergangsmatrix
H	Gesamtanzahl der Schwingbreiten eines Beanspruchungskollektivs
HCF	High Cycle Fatigue
K	Klassennummer eines Umkehrpunkts
K	Spannungsintensitätsfaktor (bruchmechanischer Parameter)
$KONF$	Konfidenzintervall, Vertrauensbereich
k	Neigungsexponent der Wöhlerkurve
LCF	Low Cycle Fatigue
M	Merkmalsvektor
μ	Mittelwert der Grundgesamtheit
n_i	vorhandene Anzahl der Schwingbreiten der Kollektivstufe i
N	ertragbare Lastwechselzahl
N_i	ertragbare Lastwechselzahl für die Schwingbreiten der Kollektivstufe i
N_D	definierte Lastwechselzahl für die Dauerfestigkeit
N_{rev}	Anzahl der Lastumkehrungen (number of reversals)
P_f	Ausfallwahrscheinlichkeit

$P_{\ddot{u}}$	Überlebenswahrscheinlichkeit
P_{SWT}	Schädigungsparameter nach SMITH, WATSON und TOPPER
q	a priori Wahrscheinlichkeit
R	Spannungsverhältnis = σ_u / σ_o
R	Beanspruchbarkeit (Resistance)
ρ	Kerbradius
σ	Standardabweichung der Grundgesamtheit
S	Beanspruchung (Stress)
s_x	Standardabweichung einer Stichprobe
σ_A	Spannungsamplitude
σ_D	Dauerfestigkeit (Spannungsamplitude für N_D)
σ_o	Oberspannung
$\sigma_{a,n}$	Nennspannungsamplitude
V	Anzahl der Variationen aus einer Menge
V	Verschiedenheitsmaß
\bar{x}	Mittelwert einer Stichprobe
Ψ	Exponent zur Bestimmung der Verschiedenheit zweier Matrizen

1 Einleitung

1.1 Notwendigkeit der Untersuchungen

Im Bauwesen vollzieht sich derzeit ein Umstrukturierungsprozess. Durch die Alterung bestehender Bauwerke, Nutzungsänderungen und die steigenden Ansprüche an den Standard hat die Notwendigkeit der Erhaltung bzw. Ertüchtigung von Bauwerken erheblich an Bedeutung zugenommen. In ökonomischer Hinsicht sind die oftmals sehr hohen Bauwerksherstellungskosten nur durch entsprechend lange Nutzungszeiträume vertretbar. Immer häufiger stellt eine Instandsetzung die deutlich kostengünstigere Alternative zum Neubau dar. Gleichzeitig steht heutzutage mehr denn je der bewusste Umgang mit Energien und Ressourcen im Vordergrund und spricht gegen Neubaumaßnahmen. Der Trend geht daher immer mehr in die Richtung, den Bestand zu pflegen und dessen Nutzung auf möglichst lange Zeiträume auszuweiten. Schließlich verleihen auch historische sowie gesellschaftliche Gesichtspunkte manchem Bauwerk einen unschätzbaren kulturellen Wert und machen dessen Erhalt daher erstrebenswert. Abb. 1.1 zeigt die Tendenz der Umlagerung der Investitionen von Neubau- auf Erneuerungs- und Erhaltungsinvestitionen [PEIL 00b].

Einen beachtlichen Beitrag stellt in diesem Zusammenhang die Pflege des großen Bestandes ermüdungsbeanspruchter Bauwerke dar, wie z.B. Eisenbahn- und Straßenbrücken, Kranbahnen, Offshore-Konstruktionen, hohe windbeanspruchte Bauwerke. Mit Hilfe einer realistischen Lebensdauervorhersage kann die Nutzungsdauer vieler Bauwerke zum Teil erheblich verlängert werden, wodurch ein gezielterer Einsatz der zur Sanierung zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel möglich wird.

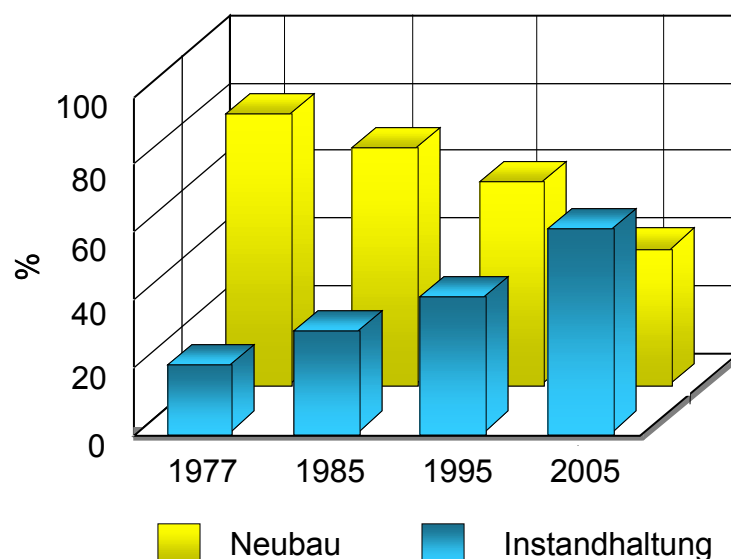


Abb. 1.1 Entwicklung der Bauinvestitionen in %

1.2 Ziele der Arbeit

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Teilprojekts B3 des 1998 gegründeten Sonderforschungsbereichs 477 *"Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung"*.

Ziel dieser Arbeit ist die Weiterentwicklung und Validierung experimenteller Methoden und Strategien zu einer zuverlässigen Lebensdauerbestimmung ermüdungsbeanspruchter Tragwerke aus Stahl. Die experimentelle Lebensdauerermittlung, welche momentan als die treffsicherste Methode gilt, hat sich bereits im Maschinenbau seit einigen Jahrzehnten in Form von standardisierten Betriebslasten-Nachfahrversuchen durchgesetzt. Die Versuche dienen i.d.R. zur Optimierung eines Serienprodukts. Im Bauwesen dagegen wurde bisher die experimentelle Lebensdauerermittlung nicht zuletzt wegen der bis vor kurzem noch als sehr teuer geltenden Mess- und Prüftechnik und wegen vieler anderer Probleme selten in Betracht gezogen.

Betriebslasten-Nachfahrversuche aus dem Maschinenbau lassen sich für Baukonstruktionen u.a. wegen wesentlich größerer Bauteilabmessungen und des Fehlens von Prototypen nicht analog anwenden. Die Einzigartigkeit jedes Falles und die vergleichsweise deutlich längeren Nutzungsdauern der Bauwerke schaffen einerseits das Problem, eine repräsentative Beanspruchungs-Zeit-Funktion zu standardisieren, andererseits die Treffsicherheit einer Lebensdauerprognose zu bestätigen. Bei Bauwerken kommt der Erfassung der Einflüsse von Beanspruchungstrends, Nutzungsänderungen, Korrosionserscheinungen etc. eine viel wichtigere Rolle zu als bei den Konstruktionen im Maschinenbau. Bei bestehenden Bauwerken liegen keine Beanspruchungs-Zeit-Funktionen für die Vergangenheit vor, so dass diese möglichst realitätsnah geschätzt werden müssen.

Die Arbeit berichtet in diesem Zusammenhang über Lösungen, Monitoring- und Versuchsstrategien, welche anhand von zahlreichen Ermüdungstests und in-situ Messungen sowie theoretischen Betrachtungen untersucht werden. Neben der Validierung der Methoden beschreibt die Generierung geeigneter Beanspruchungs-Zeitfunktionen zur Wiedergabe aktueller und künftiger Beanspruchungsverhältnisse ein weiteres Ziel. Für die Abschätzung der Restnutzungsdauer bestehender Bauwerke wird eine Möglichkeit vorgeschlagen, mit der Beanspruchungs-Zeit-Funktionen der Vergangenheit wirklichkeitsnah generiert werden können.

2 Methoden der Lebensdauerbestimmung

2.1 Das Phänomen der Werkstoffermüdung

2.1.1 Allgemeines

Das wichtigste Feld bei der Erforschung des Werkstoffverhaltens unter schwingender Beanspruchung stellt das Phänomen der Ermüdung dar. Unter Ermüdung versteht man in diesem Zusammenhang den Verlust der Beanspruchbarkeit eines Werkstoffs infolge sich häufig wiederholender Belastungen. Die reduzierte Beanspruchbarkeit liegt dabei im Regelfall deutlich tiefer als die Beanspruchbarkeit bei einmaliger Belastung.

Das Ermüdungsphänomen wurde erstmals um 1830 bei eisernen Förderketten im Bergbau erkannt. Das Problem konnte damals zunächst durch eine Änderung der Konstruktion, nämlich die Verwendung von Drahtseilen anstatt Förderketten umgangen werden. Systematische Untersuchungen begannen erst ab 1840, ausgelöst durch sich häufende Brüche an Radachsen von Postkutschen und Eisenbahnwagen. Die damals von WÖHLER entwickelte Ermüdungsprüftechnik ist noch heute im wesentlichen gültig [WÖHL 1863].

Die eigentlichen Einflussparameter sind die Schwingbreite der Beanspruchung und die Anzahl der Schwingspiele. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl von weiteren Einflussgrößen, welche den Ermüdungsvorgang beschleunigen, aber auch verzögern können. Dazu zählen unter anderem Lastfolgen, örtliche Beanspruchungen, Werkstoffeigenschaften, Einflüsse aus der Fertigung, werkstoffliche Imperfektionen und Umgebungseinflüsse.

Während des Ermüdungsprozesses ändert der Werkstoff viele seiner Eigenschaften:

- Die Mikro- und Makrostruktur (Versetzungen, Zellbildung, Gleitbänder, Zwillingsbildung etc.),
- die physikalischen Kennwerte (Dämpfung, elektrischer Widerstand, magnetische Eigenschaften, Steifigkeit (Elastizität),
- die Kontinuität (Größe, Richtung und Dichte von Schäden wie Mikro- und Makrorissen).
- Darüber hinaus ist bekannt, dass ein Teil der für die Beanspruchung des Materials aufgebrachten Verformungsenergie in Wärme und Schall umgewandelt wird.

Die zerstörungsfreie Erfassung und Nutzung einer messbaren physikalischen Größe am Werkstoff als Schädigungsindikator bzw. als Maß der Schädigung beschäftigt die Wissenschaft bereits seit Jahrzehnten (z.B. [HARI 82], [FIED 94], [BATH 00]). Es ist jedoch bis dato

nicht gelungen, eine für den praktischen Einsatz befriedigende bzw. effektive Lösung zu finden, so dass die Entwicklung noch bei weitem nicht abgeschlossen ist. Ohne hier auf die einzelnen Messmethoden näher einzugehen, lassen sich einige Probleme wie folgt zusammenfassen:

- In der Regel sind die Änderungen von Messgrößen so gering, dass sie kaum als ein eindeutiges Signal verwertet werden können und es fehlt die Robustheit gegenüber Störeinflüssen.
- Die Korrelation zwischen der gemessenen Größe und dem Ermüdungszustand streut im starken Maße und ist daher statistisch zu betrachten.
- Zum Teil gelingt die Erfassung einer Änderung nur unter "sterilen" Laborbedingungen und mit hohem gerätetechnischen Aufwand.
- Oft treten messbare Ereignisse erst unmittelbar kurz vor einem größeren Schaden verstärkt auf, z.B. vor dem ersten sichtbaren Anriss. Es ist jedoch anzustreben, den Anriss möglichst frühzeitig zu prognostizieren.

Nach AURICH sind die oben erwähnten messbaren Größen, welche oft auch als Sekundäreffekte bezeichnet werden, zur Herleitung eines kontinuums-mechanischen Schädigungsparameters ungeeignet [AURI 94]: "... sie beruhen alle auf Folgewirkungen der Zunahme von Versetzungsdichte im Werkstoff durch plastische Wechselverformungen und stehen mit der Anrissentstehung selbst aber nur mittelbar und statistisch im Zusammenhang." Die Rissentstehung geht bekanntlich i.a. von der Oberfläche bzw. einer inneren Oberfläche des Materials aus. Sie ist somit ein Oberflächen- und kein Volumeneffekt. Die Sekundäreffekte sind jedoch meist volumenbezogen. Daher braucht man zur "Schädigungsmessung" ein sehr hoch auflösendes Messverfahren, das in der Lage ist, kleinste Änderungen im Oberflächenbereich zu erfassen.

Ausgehend von einer Betrachtung auf energetischer Basis, ausgedrückt durch den Zusammenhang zwischen der Lebensdauer und der mechanischen Hysterese, deren Fläche als Maß der verrichteten Verformungsarbeit gilt, wird das Problem ebenfalls nicht vollständig gelöst. Die plastische Verformung, deren Anteil ohnehin schwer zu bestimmen ist, stellt nämlich eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung für das Entstehen eines Ermüdungsbruchs dar [AURI 94]. Als notwendige Zusatzbedingung gilt das Vorhandensein von Anrissen an der Oberfläche oder unmittelbar darunter. So kann einer Probe durch Abarbeiten von entstandenen Oberflächenrissen zu einer gegenüber der Wöhlerkurve mehrfachen Lebensdauer verholfen werden.

Es bleibt festzuhalten, dass man "von der Ermittlung des Schädigungszustandes in allen seinen Stadien noch weit entfernt" ist [AURI 94]. Eine ähnliche Meinung wird von KOTTE

vertreten. Demnach ist mit einer allgemeingültig zutreffenden Beschreibung der Vorgänge der Werkstoffermüdung in absehbarer Zukunft nicht zu rechnen [KOTT 00].

2.1.2 Stadien der Bruchentstehung

Betrachtet man den Ablauf des Ermüdungsvorgangs an einem Stahlbauteil anhand von Änderungen bzw. Zerstörungen des Korngefüges, lassen sich drei Phasen unterscheiden:

Risseinleitung

Die Strukturänderungen (Schäden) spielen sich ausschließlich im Mikrobereich ab. Es bilden sich Gleitbänder in den Ebenen maximaler Schubbeanspruchung. Wechselgleitungen führen in Form von Gleitstufen zum Aufstau von Versetzungen an der Werkstoffoberfläche, welche zur Ausbildung von Spitzen und Tälern führen ("waschbrettähnliche" Extrusionen und Intrusionen). Entlang der Gleitbänder entstehen Mikrorisse, deren Länge noch unter der Korngröße des Werkstoffs liegt.

Rissausbreitung

Die zyklisch stabile Rissausbreitung setzt ein, wenn die Mikrorisslängen etwa die Größe eines Kornes erreicht haben. Durch das Wachsen einzelner Mikrorisse oder durch Vereinigung vieler Mikrorisse entsteht ein Makroriss. Die Länge eines Makrorisses, der i.a. als technischer Anriss definiert wird, beträgt etwa 1mm.

Restbruch

Durch das Wachsen des Anrisses verkleinert sich der Restquerschnitt. Man spricht von stabilem Risswachstum solange der Riss zwar lastwechselweise weiterwächst, aber die sog. kritische Risslänge noch nicht erreicht wurde. In dieser Phase öffnet sich der Riss unter der Belastung, reißt jedoch nicht unkontrolliert auf. Wird die kritische Risslänge überschritten, setzt das instabile Risswachstum ein. Dies zeichnet sich durch den duktilen Restbruch ab. Dabei versagt der verbleibende Restquerschnitt durch das letzte Schwingenspiel infolge der Überschreitung der Zugfestigkeit des Materials.

Die Bruchlastwechselzahl eines Bauteils unter schwingender Beanspruchung setzt sich zusammen aus der Summe der Lastwechsel, welche während der genannten drei Stadien durchlaufen werden.

2.2 Rechnerische Methoden der Lebensdauerermittlung

2.2.1 Notwendigkeit

Viele Konstruktionen des Maschinen- und Stahlbaus werden während ihrer Standzeit einer nicht ruhenden Beanspruchung ausgesetzt. Daher stellt sich die Notwendigkeit, bereits in der Entwurfphase die Werkstoffermüdung zu berücksichtigen und im Rahmen einer Betriebsfestigkeitsabschätzung eine Angabe über die zu erwartende Lebensdauer der Konstruktion zu machen. Gegenwärtig wird diese Notwendigkeit durch das Bedürfnis nach größerer Sicherheit und Zuverlässigkeit sowie den sinnvollen Gedanken verstärkt, bei gegebener Sicherheit Bauwerke möglichst lange zu nutzen. Seit Jahrzehnten wird weltweit angestrebt, den äußerst komplexen Ermüdungsvorgang durch rechnerische Modelle zu erfassen und durch die Entwicklung von Lebensdauerkonzepten diesem genüge zu tragen. In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten in der Praxis eingesetzten Konzepte kurz vorgestellt. Ausführliche Erläuterungen der Konzepte können beispielsweise [HAIB 89], [RADA 95] oder [SEEG 96] entnommen werden.

2.2.2 Nennspannungskonzept und verwandte Methoden

Nennspannungskonzept

Das Nennspannungskonzept wird in der Praxis am häufigsten eingesetzt. Diese Methode wird von den Ingenieuren nicht zuletzt wegen der einfachen Anwendbarkeit bevorzugt. Die erforderlichen Eingangsdaten (Nennspannungen) können im Regelfall den Berechnungsunterlagen direkt entnommen werden. Außerdem ist eine Lebensdauerbestimmung auf der Grundlage von Nennspannungen in vielen Regelwerken zum Nachweis der Betriebsfestigkeit bzw. Dauerfestigkeit aufbereitet (z.B. Eurocode 3, DIN 4132, DS 804).

Grundlage des Nennspannungskonzepts ist eine dem zu untersuchenden Detail entsprechende Bauteilwöhlerlinie, die alle bauteilbezogenen Einflussgrößen erfasst und i.d.R. aus sog. Kerbfallkatalogen entnommen werden kann (z.B. [OLIV 79]). Eine Bauteilwöhlerlinie ist die Funktion der ertragbaren Spannungsamplituden σ_A über den Lastwechseln N . Wöhlerlinien werden in Einstufenermüdungsversuchen ermittelt. Es gibt aber auch Verfahren zur groben Abschätzung von Wöhlerlinien aus den Materialkennwerten und Bauteileigenschaften ([HÜCK 83], [HAIB 89]). Formelmäßig lässt sich die Wöhlerlinie innerhalb des sog. Zeitfestigkeitsbereichs als Gerade in doppeltlogarithmischer Auftragung in einem N - σ_A -Diagramm darstellen.

$$\sigma_A = \sigma_D \cdot \left(\frac{N_D}{N} \right)^{-k} \quad (2.1)$$

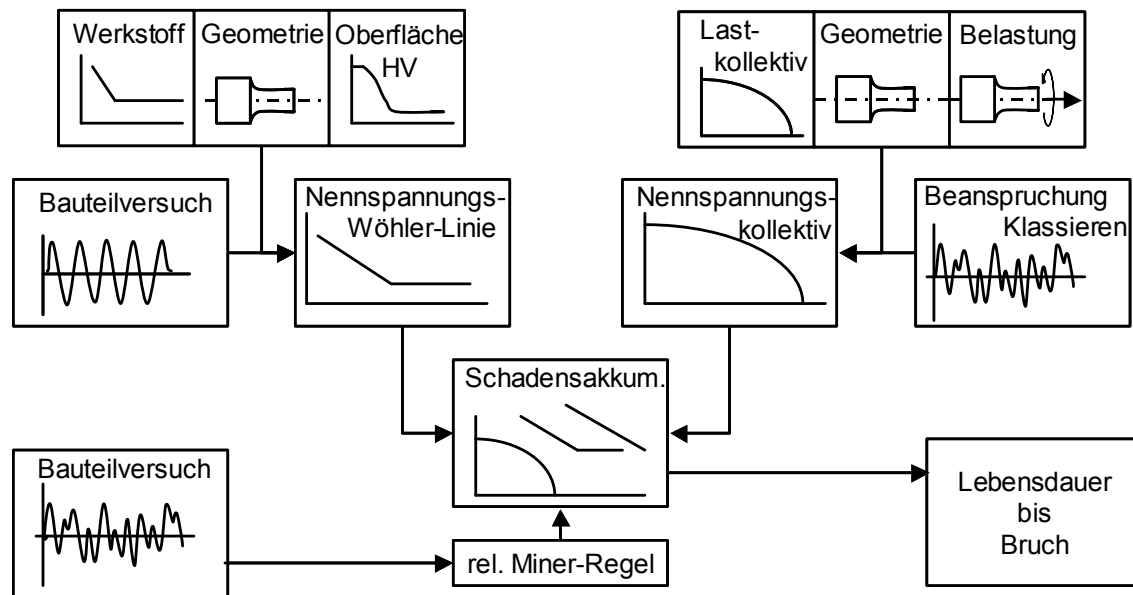


Abb. 2.1 Ablaufschema der Lebensdauerabschätzung für Bauteile nach dem Nennspannungskonzept unter Verwendung der relativen Miner-Regel nach [KLOOS 89], publiziert in [RADA 95]

Hierzu ist die Angabe eines Bezugspunktes ($N_D; \sigma_D$) und des Neigungsexponenten k erforderlich. Als Eingangsgröße einer Berechnung nach dem Nennspannungskonzept dienen alle innerhalb eines Betriebsintervalls auftretenden Schwingbreiten, welche aus der Beanspruchungs-Zeit-Funktion gezählt und in Größe und Häufigkeit durch ein Kollektiv beschrieben werden. Häufig wird zur Zählung die Rainflow-Methode eingesetzt, welche unter Berücksichtigung des zyklischen Werkstoffverhaltens jene Schwingbreiten auszählt, die geschlossene (schädigungsrelevante) Hysteresen liefern [CLOR 86]. Anhand der Wöhlerlinie lassen sich die Schwingbreiten bezüglich ihrer schädigenden Wirkung bewerten:

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (2.2)$$

Der Teilschaden D_i ist das Verhältnis der vorhandenen Anzahl n_i der Schwingbreiten einer Kollektivstufe zu der nach der Wöhlerlinie ertragbaren Anzahl N_i dieser Schwingbreite. In bestimmten Fällen werden die Spannungsverhältnisse bzw. die Mittelspannungen der Schwingbreiten berücksichtigt, indem sie entsprechend gewichtet werden (vgl. z.B. Amplitudentransformation [HAIB 89]). Die Lebensdauer wird mit Hilfe einer Schadensakkumulationsregel, zumeist auf der Grundlage der Hypothese nach Palmgren (1924) und Miner (1945) oder einer Variante davon berechnet (z.B. [HAIB 70], [ZENN 92], [REPP 86]). Mit Ausnahme der relativen Form der Miner-Regel (vgl. Abb. 2.1), für welche die kritische Schädigungssumme experimentell bestimmt wird, ist das Versagenskriterium erfüllt, wenn die Summe der Teilschädigungen 1,0 ist.

Strukturspannungskonzept (Hot-Spot Konzept)

Bei komplexen, geschweißten Bauteilen, wie z.B. Rohrknöten von Offshore-Konstruktionen oder Konstruktionen im Behälterbau, können die Spannungen nicht mehr auf Grundlage der elementaren Festigkeitslehre berechnet werden. Hierzu müssen höhere Tragwerkstheorien bzw., wie heutzutage üblich, numerische Methoden oder Messungen eingesetzt werden. Die interessierenden Spannungen werden als sog. Strukturspannungen unter Berücksichtigung der Geometrie des Bauteils ohne Berücksichtigung der Kerbwirkung der Schweißnaht bestimmt. Zulässige bzw. ertragbare Werte der Strukturspannungen sind in verschiedenen Regelwerken in Form von Bauteilwöhlerlinien angegeben (z.B. UK-DoE-T, AWS-D1-1). Sie berücksichtigen z.T. neben der Kerbwirkung infolge der Nahtform auch andere wichtige Einflüsse, wie z.B. korrosive Umgebungsbedingungen von Offshore-Konstruktionen. Eingangswert für diese Bauteilwöhlerlinien ist die örtliche Beanspruchung an einer definierten Stelle vor der Naht, welche nach vorgegebenen Regeln der Extrapolation zu ermitteln ist. Die Lebensdauerermittlung erfolgt analog dem Nennspannungskonzept mit Hilfe einer Schadensakkumulationsregel.

Konzept der örtlich elastischen Beanspruchungen (Kerbspannungskonzept)

Das Kerbspannungskonzept wird beispielsweise im Fahrzeug-, Brücken- und Behälterbau eingesetzt. Die örtlichen Spannungen werden unter Berücksichtigung der Kerbwirkung ermittelt. Die Berechnung erfolgt auf elastizitätstheoretischer Grundlage. Da ein elastisches Werkstoffverhalten näherungsweise nur im Dauerfestigkeitsbereich angenommen werden kann, eignet sich dieses Konzept zunächst nur zur Bestimmung von Wechselfestigkeitsigkeiten, indem man die Kerbspannungsamplituden den Werkstoffwechselfestigkeitsigkeiten gegenüberstellt. So gesehen ist das Kerbspannungskonzept quasi nur ein Spannungsnachweis zur Abschätzung der Dauerfestigkeit. Für Schweißnähte lässt sich ausgehend von der Dauerfestigkeit die Zeitfestigkeit über die statistisch abgesicherte normierte Wöhlerlinie für Schweißstöße nach Haibach [HAIB 89] abschätzen, wodurch dann ein Vorgehen entsprechend dem Nennspannungskonzept möglich ist.

Folge-Wöhler-Kurven-Konzept (FWK-Konzept)

Die Belastungsreihenfolgen bleiben bei den bisher erwähnten Konzepten unberücksichtigt. Das FWK-Konzept [SCHO 97] basiert auf dem Nennspannungskonzept und berücksichtigt durch eine schwingspielweise Modifikation der Ausgangs-Wöhler-Kurve die Reihenfolge der Belastung. Aus speziellen Zweistufenversuchen werden Ermüdungsfunktionen gewonnen, aus denen Parameter für eine Verschiebung und Verdrehung der Ausgangs-Wöhler-Kurve in Abhängigkeit der Vorbelastung hergeleitet werden. Es werden keine Zählverfahren benötigt, da schwingspielweise gerechnet wird. Allerdings ist der experimenteller Aufwand zur Beschaffung der erwähnten Ermüdungsfunktionen enorm und es kann gegenwärtig in den seltensten Fällen auf entsprechende Daten zurückgegriffen werden.

2.2.3 Örtliches Konzept (Kerbgrund- bzw. Kerbdehnungskonzept)

Das örtliche Konzept wird vorwiegend im Behälterbau und in der Anlagentechnik eingesetzt. Es zeichnet sich im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Konzepten dadurch aus, dass zur Schädigungsberechnung *keine* bauteilspezifischen Wöhlerlinien erforderlich sind, wodurch die Anwendbarkeit des Konzepts auf beliebige Strukturen und Kerbdetails möglich ist. Dem Konzept liegt die Annahme zugrunde, dass das hochbeanspruchte Element im Kerbgrund das gleiche Ermüdungsverhalten zeigt wie eine glatte Probe unter gleicher Beanspruchung. Hierzu werden die örtlichen Spannungen und Dehnungen in der Kerbe auf der Grundlage eines zyklischen elastisch-plastischen Werkstoff- bzw. Bauteilverhaltens ermittelt und den örtlich ertragbaren Spannungen und Dehnungen des Werkstoffs gegenübergestellt. Die erforderlichen Werkstoffeigenschaften werden an axial beanspruchten glatten Proben ermittelt. Diese sind zum einen die sog. zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve (ZSD-Kurve) und zum anderen eine Dehnungswöhlerlinie. Die ZSD-Kurve erlaubt die Bestimmung von Hysteresen im σ - ϵ -Raum unter zyklischer Beanspruchung. Die Beziehung zwischen der Gesamtdehnungsamplitude und der Anrisslastwechselzahl wird durch die Dehnungswöhlerlinie angegeben.

Abb. 2.2 stellt den Ablauf einer Lebensdauerberechnung nach dem Kerbgrundkonzept schematisch dar. Zunächst wird ein mechanischer Zusammenhang zwischen der äußeren Belastung und der Kerbgrundbeanspruchung hergestellt. Ausgehend von der ZSD-Kurve werden die Spannungs-Dehnungspfade im Kerbgrund infolge der äußeren Belastung bestimmt. Hierzu werden numerische Verfahren, aber auch analytische Näherungsverfahren eingesetzt ([NEUB 61], [SEEG 77]). Mit Hilfe einer Rainflow-Zählung werden aus der Beanspruchungs-Zeit-Funktion des betrachteten Betriebsintervalls die geschlossenen Hystereseschleifen gezählt und anschließend bewertet. Der Einfluss der Mittelspannung

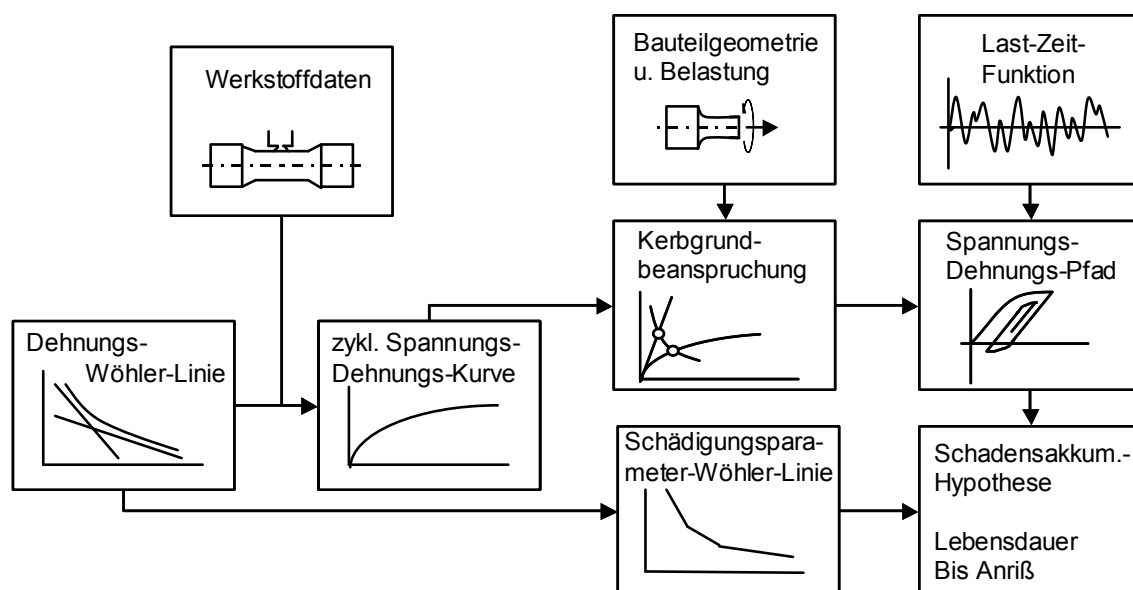


Abb. 2.2 Ablaufschema der Lebensdauerberechnung bis Anriss nach dem Kerbgrundkonzept u.a. publiziert in [KLOOS 89] und [RADA 95]

auf die Schädigung wird dabei durch einen Schädigungsparameter bzw. -kennwert berücksichtigt. Die Lebensdauer wird ähnlich wie beim Nennspannungskonzept mittels einer Schadensakkumulationsregel bestimmt. Beim Kerbgrundkonzept ist es ebenfalls möglich, die Hysteresen nicht vorweg auszuzählen, und stattdessen zur Berücksichtigung von Reihenfolgeeffekten entlang des Spannungs-Dehnungs-Pfads schwingspielweise zu rechnen. Nach einem Vorschlag von HANSCHMANN kann so die Reihenfolge der Belastung durch eine schwingspielweise zu berechnende Zusatzschädigung berücksichtigt werden [HANS 81].

2.2.4 Bruchmechanisches Konzept (Rissfortschrittskonzept)

Das Rissfortschrittskonzept wird zur Berechnung der Restlebensdauer eines Details nach erfolgtem Anriss angewandt, um den Einfluss von Fertigungsfehlern zu bewerten oder zur Aufrechterhaltung eines Sicherheitsniveaus abhängig von beobachteter Risslänge für ein Bauteil Inspektionsintervalle festzulegen. Anhand von experimentell ermittelten Werkstoffkennwerten kann das Rissfortschrittsverhalten durch eine Kennfunktion wiedergegeben werden (vgl. PARIS-ERDOGAN-Gleichung [SEEG 96]). Maßgebend für das Risswachstum ist die Beanspruchung an der Rissspitze. Hierzu wird wegen der Singularität an der Rissspitze die Beanspruchung anstatt durch Dehnungen bzw. Spannungen durch den Spannungsintensitätsfaktor K , bei größeren Plastizierungen durch das J -Integral bzw. die Rissspitzenverschiebung δ ausgedrückt. Das berechnete Risswachstum ist dabei in starkem Maße von der Belastung sowie von der (tatsächlichen) aktuellen Risslänge abhängig.

Basierend auf dem bruchmechanischen Konzept sei noch auf Arbeiten von OEHLERS et al. verwiesen, welche die Lebensdauer nicht durch die noch ertragbare Lastwechselzahl bis zum Versagen angeben, sondern sich mit der Angabe von Restfestigkeiten als Funktion der Ermüdungsbelastung befassen [OEHL 95].

2.2.5 Kritik der modellbasierten Lebensdauerermittlung

Die oben vorgestellten Konzepte stellen als Schädigungsmodelle nur ein Glied in der Kette der modellbasierten Lebensdauerermittlung dar. Im folgenden wird die gesamte Kette vorgestellt und bewertend diskutiert.

Derzeitig übliche Lebensdauervorhersagemethoden liefern durchweg unzuverlässige Ergebnisse, da sie zur Vorhersage der Lebensdauer Modelle benötigen, die z.T. mit großen, oftmals unvermeidbaren Unsicherheiten behaftet sind. Bei der üblicherweise verwendeten Modellkette



dient das Ergebnis jedes Einzelmodells als Input für das nächste, so dass durch die multiplikative Verknüpfung der Einzelzuverlässigkeiten die Zuverlässigkeit der Gesamtprognose gering ausfällt.

Einwirkungsmodell

Das Einwirkungsmodell wird für Brücken und ähnliche Bauwerke in der Regel determiniert vorgegeben (DIN 1072, DS 804). Hierdurch treten starke Abweichungen von der Wirklichkeit auf. Somit führt eine Standardisierung der Belastung durch die Normung unweigerlich zu Modellungenauigkeiten. Nach HIRT ist "das Ermüdungsverhalten eines gegebenen Bauwerks oder seiner Tragelemente beeinflusst durch die Beanspruchungen infolge der tatsächlich auftretenden Betriebslasten, und nicht durch die Normlasten, die der statischen Berechnung zugrunde gelegt werden" [HIRT 77]. Eine Studie aus der USA stellt fest, dass die Lebensdauern von Brücken infolge der in den letzten Jahren stark angestiegenen Anzahl der (genehmigungspflichtigen) Schwertransporte signifikant beeinträchtigt wird [DICK 95].

Daher geht der Trend - auch wegen der fortgeschrittenen Entwicklung in der Messtechnik - immer mehr dazu über, zuverlässige Beanspruchungskollektive durch Messungen entweder unmittelbar am Untersuchungsobjekt oder zumindest an ähnlich belasteten Objekten zu ermitteln. Dieses gilt sowohl für Brücken als auch für andere ermüdungsbeanspruchte Konstruktionen ([SEDL 84], [PEIL 95], [ZENN 99], [KOLS 00], [BAIL 00]).

Systemmodell

Das Systemmodell ist im Vergleich zu den anderen Modellen vermutlich das zuverlässigste, obwohl auch hier systematische und zufällige Fehler auftreten können [BRAN 94/96], [SIMU 99]. Es treten u.U. nicht planmäßige Tragwirkungen auf sowie geometrische Abweichungen der Querschnitte und der Struktur, Fertigungstoleranzen und Streuungen der Werkstoffkennwerte, welche bei der modellhaften Beschreibung des Systems i.a. nicht vollständig berücksichtigt werden. In vielen Fällen werden die Beanspruchungen überschätzt, weil beim Entwurf auf der sicheren Seite liegende Annahmen getroffen wurden. Allerdings gibt es auch einige Beispiele dafür, dass die Beanspruchungen teilweise unterschätzt werden [NATH 93], [CUNI 96].

Schädigungsmodell

Die größte Unsicherheit enthält das Schädigungsmodell. Da die äußerst komplexen Vorgänge des Ermüdungsprozesses bei weitem noch nicht restlos erforscht und aufgeklärt worden sind, versucht man den Ermüdungsvorgang durch heuristisch erarbeitete Modelle phänomenologisch anhand von Versuchsbeobachtungen pauschal zu beschreiben. Das Thema Ermüdung wird quasi als "Black Box" behandelt. Dabei dient die Beanspruchung zusammen mit einer Reihe von Randbedingungen als Input, die Anrisslastwechselzahl als

Output. Durch diese Vorgehensweise ergibt sich sehr schnell das Problem der Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf andere Fälle.

Die Übertragung des im Versuch beobachteten Werkstoffverhaltens auf einen beliebigen Fall aus der Praxis ist für den statischen Fall, bei dem sich die Anzahl der Einflussgrößen und ihre Auswirkung in Grenzen halten, durchaus vertretbar. Dieses gilt beispielsweise für den Zug- bzw. Kerbschlagversuch. Es sei bemerkt, dass auch in diesen Fällen die Grenzen für eine 100%-ige Übertragbarkeit überschritten werden, wenn es um die Berechnung von Bauteilen mit einer mehrachsigen Beanspruchung geht oder wenn der Winkel zwischen der Beanspruchungsrichtung und der Texturrichtung im Kerbschlagversuch und im realen Bauteil nicht identisch sind. Meist ist die Auswirkung des Übertragbarkeitsproblems bei statischen Untersuchungen hinnehmbar. In der Regel können durch auf der sicheren Seite liegende Versuchsbedingungen bzw. Fraktilwertbetrachtungen Sonderfälle abgedeckt werden, ohne dass es zu einer extrem unwirtschaftlichen Überdimensionierung kommt. Zur Ermittlung von mehrachsigen Beanspruchbarkeiten existieren außerdem gut zutreffende Hypothesen: z.B. Vergleichsspannungshypothese nach MISES, oder Hauptspannungshypothese.

Im zyklischen Fall hingegen ist das Spektrum der möglichen Einflussparameter erheblich breiter und deren Auswirkung auf die Lebensdauer z.T. enorm ([RADA 95], [HAIB 89]). Folglich entsteht immer wieder das Problem der Übertragbarkeit der unter Versuchsbedingungen ermittelten Erkenntnisse auf den speziellen Anwendungsfall, weil die Bedingungen, unter denen der Versuch stattgefunden hat, selten identisch sind mit denen des interessierenden Falles. Das bekannteste Problem in diesem Zusammenhang ist die Verwendung einer Wöhlerlinie für eine konstante Mittelspannung zur Ermittlung der Betriebsdauer eines mehrstufig belasteten Bauteils mit veränderlicher Mittelspannung.

Ein weiteres Problem ist die natürliche Streuung der Werkstoffeigenschaften und der anderen am Ermüdungsprozess beteiligten Einflussparameter. Je mehr streuende Einflussparameter an einem Prozess beteiligt sind, umso schwieriger bzw. unzuverlässiger werden naturgemäß die abzugebenden Prognosen. Hinzu kommt noch die Sensitivität vieler Rechenmodelle bzgl. Eingangsdaten. Eine Arbeit von GRAF und ZENNER zeigt, dass bereits geringe relative Fehler einiger Eingangsgrößen in einer Größenordnung von 5% eine Fehleinschätzung der Lebensdauer um einen Faktor von 2,5 bewirken können [GRAF 94].

Schließlich ist noch zu erwähnen, dass die in vielen Konzepten verwendete Schadensakkumulationshypothese empirischen Ursprungs ist und sich physikalisch nicht begründen lässt [FRAN 85]. Die von Palmgren und Miner festgesetzte Schadenssumme von 1,0 wird inzwischen seit über 40 Jahren von verschiedenen Autoren als nicht immer zutreffend deklariert (z.B. [CORT 56], [FRAN 85], [AGER 00]). Es wurden bisher in Experimenten Scha-

denssummen zwischen 0,1 und 10,0 beobachtet [SCHÜ 00]. Dennoch wird Schadensakkumulationshypothese von Palmgren und Miner heute in Ermangelung besserer Alternative leider noch oft genug verwendet.

Die Unzulänglichkeiten der oben dargestellten Konzepte werden in der Literatur vielschichtig diskutiert. Ein umfassender Überblick ist in [HAIB 89] dargestellt. Weitere Arbeiten, die sich detaillierter mit den Unsicherheiten der rechnerischen Lebensdauerkonzepte befassen, sind u.a. [SCHÜ 94/00], [EULI 97/98], [BYER 97], [KOTT 00]. Die Liste solcher Arbeiten ist lang. Unabhängig davon ist die Tatsache, dass inzwischen eine Vielzahl von Methoden und Varianten existiert, von denen sich aber bisher keine für die allgemeine Anwendbarkeit durchsetzen konnte, ein Indiz für die geringe Treffsicherheit vorhandener rechnerischer Konzepte.

Trotz allem gelten rechnerische Lebensdauerkonzepte als unverzichtbar, wenn es um Vordimensionierungsaufgaben geht oder wenn Kosten- und Zeitgründe eine experimentelle Lebensdauerbestimmung nicht zulassen.

2.3 Probabilistische Methode der Lebensdauerermittlung

Aufgrund der starken Streuungen der lebensdauerbeeinflussenden Parameter ist es nicht sinnvoll, Lebensdauerprognosen deterministisch zu betrachten. Hierzu sind die probabilistischen bzw. die auf die Zuverlässigkeitstheorie basierenden Methoden zweckmäßig ([GUER 86], [GRUN 89], [SCHU 99]).

Probabilistische Bemessungskonzepte ermöglichen neben der Ermittlung einer absoluten Versagenswahrscheinlichkeit für ein Tragwerk auch die Kalibrierung eines Vergleichsmaßstabs, mit dem ein möglichst gleichmäßiges und damit auch ein wirtschaftliches Zuverlässigkeitsniveau für alle Konstruktionselemente gewährleistet werden kann ([REPP 84/86], [TORG 94], [NANJ 94], [GEIS 95]).

Die probabilistische Vorgehensweise berücksichtigt alle lebensdauerbeeinflussenden Parameter als Zufallsvariablen mit gegebenen Verteilungen. Für ein Versagen bzw. für einen Versagenspfad wird eine sog. Grenzzustandsgleichung definiert, nach der ein Versagen bzw. ein Ausfall eintritt, wenn

$$R - S < 0 \quad (2.3)$$

gilt, wobei S (= Stress) und R (= Resistance) die sog. Basisvariablen sind. Diese Variablen

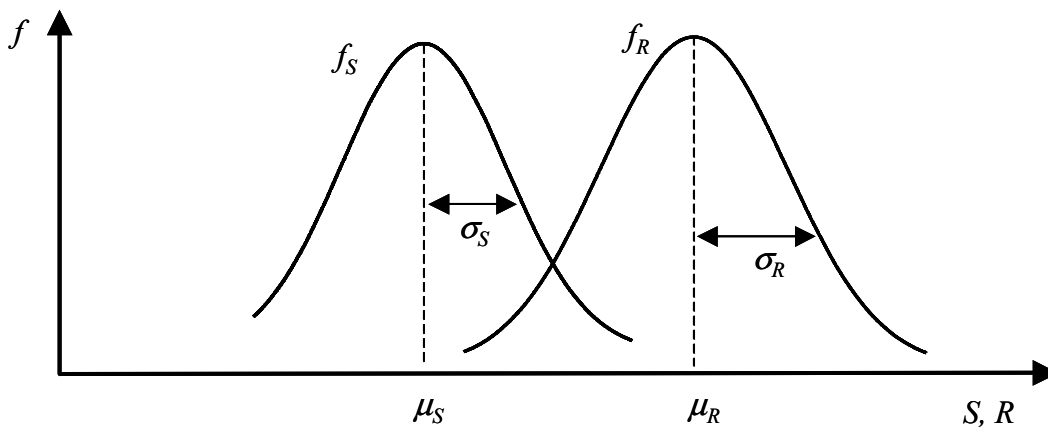


Abb. 2.3 Beanspruchung S und Beanspruchbarkeit R als normalverteilte Basisvariablen

sind als Funktionen von lebensdauerbeeinflussenden Parametern ebenfalls Zufallsgrößen (vgl. Abb.2.3). Der Überlappungsbereich der Verteilungen von R und S ist ein Maß für die Ausfallwahrscheinlichkeit bzw. den sog. Sicherheitsindex β [SPAE 92]. Im Falle unabhängiger, normalverteilter Basisvariablen ergibt sich β aus

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}. \quad (2.4)$$

Ein großer Abstand zwischen den Mittelwerten μ_R und μ_S der Verteilungen bedeutet nicht unbedingt eine größere Sicherheit gegenüber Versagen. Entscheidend dabei sind die Streuungen σ der Basisvariablen. Der Sicherheitsindex β berücksichtigt diesen Zusammenhang.

Voraussetzung einer realistischen Zuverlässigkeitsstudie sind Kenntnisse über Streuungen und Verteilungsgesetze der die Standsicherheit bestimmenden Variablen. Eine hinreichend genaue Bestimmung dieser Verteilungsgesetze ist in der Praxis jedoch häufig problematisch.

In vielen Fällen sind die Basisvariablen zeitvariant [PETR 99]. Abb. 2.4 stellt diesen Zusammenhang schematisch für eine Straßenbrücke dar. Während die Ermüdungsfestigkeit infolge der Lastwechsel und Korrosion mit der Zeit abnimmt, kann sich gleichzeitig auf der Beanspruchungsseite eine Zunahme des Verkehrsaufkommens abzeichnen. Der zeitliche Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeit (bzw. des Sicherheitsindex) kann im zeitvarianten Fall durch eine Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit zu bestimmten Zeitpunkten ermittelt werden. Diese Vorgehensweise setzt neben der Kenntnis der Verteilungen der Basisvariablen noch die Kenntnis ihres zeitlichen Verlaufs voraus. Eine hinreichend genaue Schätzung der zeitlichen Verläufe der Basisvariablen ist häufig nicht einfach bzw. unmöglich (vgl. Abb. 2.4).

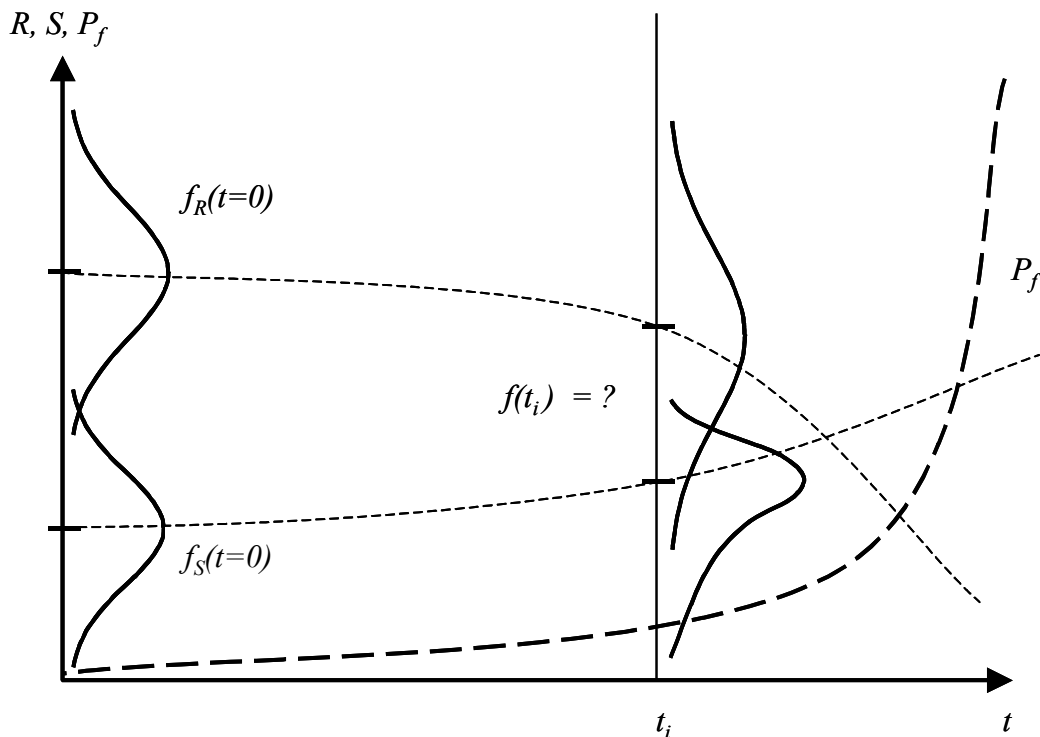


Abb. 2.4 Ungünstige Änderung der Verteilungen der Basisvariablen R und S über die Nutzungsdauer und zugehörige Zunahme der Versagenswahrscheinlichkeit P_f (schematisch)

Ausführliche Anmerkungen zur Zuverlässigkeitstheorie können z.B. [FLEI 88], [SPAE 92], [SCHN 94], [SEEG 96] entnommen werden.

2.4 Experimentelle Methode der Lebensdauerermittlung

Seit Anfang der 70er Jahre gewinnt - vorwiegend in Maschinenbau - das experimentelle Verfahren zur Lebensdauerermittlung immer mehr an Bedeutung [GASS 73]. Der Grund ist die fortschreitende Entwicklung der servohydraulischen und rechnergestützten Versuchsanlagen, wodurch die Versagenslastspielzahl eines Konstruktionsdetails im Labor durch Ermüdungstests an Prototypen bzw. adäquaten Proben ermittelt werden kann. Die Beanspruchungs-Zeit-Funktion für den Lebensdauerversuch wird i.d.R. aus Messungen der Beanspruchung im Betrieb gewonnen (Monitoring).

Die Bestimmung der Lebensdauer auf experimenteller Basis gilt heute als die zuverlässigste Methode, da hierbei die unsicheren Modelle für die Last, das System und die Schädigung vermieden werden ([ANDK 95], [ÅKES 96], [AGER 99/00], [BRAN 94], [SCHW 97], [KOTT 00]). In vielen Fällen wird jedoch die Methode nur partiell angewandt bzw. es werden nicht alle Modelle konsequent vermieden. Im Ergebnis muss dann mit Einbußen bei

der Zuverlässigkeit gerechnet werden. Beispielsweise beschränkt sich das eingesetzte Monitoring eines Bauwerks oft auf das (kurzzeitige) Messen von Beanspruchungskollektiven, welche dann mit Hilfe verschiedener Schadensakkumulationshypothesen bewertet werden. Gelegentlich wird für ein Detail, für das kein Kerbfall aus Standards zur Verfügung steht, experimentell eine Ermüdungsfestigkeitskurve bestimmt ([CUNI 96], [FRYB 99], [DEMP 00], [KOLS 00], [YAMA 00]). In einigen Arbeiten ersetzen Laborversuche das Schädigungsmodell ([ANDK 95], [AGER 99/00]). Allen Prognosen liegt jedoch eine (zufällig) gemessene Beanspruchungs-Zeit-Funktion zugrunde, Trends und Nutzungsänderungen können hierbei - im Gegensatz zur nachfolgend vorgestellten Vorgehensweise - nicht berücksichtigt werden.

Die in dieser Arbeit dargestellten Vorgehensweisen gehen über die bisher bekannten Konzepte zur Lebensdauerbestimmung hinaus. Es werden mehrere Möglichkeiten zur Erhöhung der Prognosezuverlässigkeit in Betracht gezogen.

3 Experimentelle Lebensdauervorhersage für Bauwerke

3.1 Generelle Vorgehensweise

Durch die Kombination von Monitoring-Strategien am Bauwerk und zusätzlichen Laborversuchen in Form einer adaptiven Anpassung an das tatsächliche Systemverhalten und an die wirkliche Belastungsentwicklung kann eine deutlich bessere Vorhersage des Ermüdungsverhaltens von Tragwerken erreicht werden.

Hierzu werden zunächst die Beanspruchungen (hier: Dehnungen) direkt an den kritischen Nachweispunkten kontinuierlich gemessen (Monitoring), so dass eine Modellierung sowohl der Einwirkungen als auch des Systems entfallen kann. Mit den gemessenen Beanspruchungen und den daraus z.B. mit Hilfe von Rainflow-Zählverfahren ermittelten Beanspruchungskollektiven kann eine Schädigungsberechnung nach den bekannten linearen oder nichtlinearen Verfahren durchgeführt werden [KOLS 00]. Eine auf diese Weise durchgeführte Ermittlung der Lebensdauer umgeht die ersten beiden Modelle, ist aber nach wie vor wegen der dem Schädigungsmodell anhaftenden erheblichen Unsicherheit nicht sonderlich zuverlässig [SCHÜ 94]. Um die Unsicherheiten des Schädigungsmodells ebenfalls auszuschließen, wird die Lebensdauer anhand von adäquaten Ermüdungsversuchen im Labor ermittelt. Hierzu werden Prüfkörper untersucht, die dem Detail des realen Bauwerks im Idealfall vollständig entsprechen. Falls das zu untersuchende Detail sehr groß ist, kann auch ein passender Ausschnitt (Hot-Spot) untersucht werden. Das Detail wird in einer digital regelbaren Prüfmaschine unter Verwendung einer geeigneten Beanspruchungs-Zeit-Funktion geprüft. Anhand der Beobachtungen im Experiment, das in der Regel ohne Belastungspausen und zeitlich gerafft abläuft, werden Prognosen für die Lebensdauer des untersuchten Bauwerks bzw. Bauwerksdetails gemacht.

Die schematisierte Vorgehensweise bei der klassischen Methode im Vergleich zu dem verbesserten Ansatz ist in Abb. 3.1 dargestellt. Auf die einzelnen Module wird in den folgenden Abschnitten näher eingegangen.

Wie erwähnt, werden im Fahrzeug- und Flugzeugbau seit einigen Jahren zur Reduzierung der Modellfehler standardisierte Betriebslasten-Nachfahrversuche an Prototypen durchgeführt. Diese erfassen im Prinzip die wesentlichen Reihenfolgeeffekte, die bekanntlich eine erhebliche Auswirkung auf die Lebensdauer haben können ([HAIB 89], [BUXB 95]). Während im Maschinenbau die Versuche meist der Optimierung einer Serie dienen, liegen im Bauwesen die Zielsetzungen und die Fragestellungen anders, so dass Untersuchungen unterschiedlicher Aspekte auf diesem Gebiet notwendig sind.

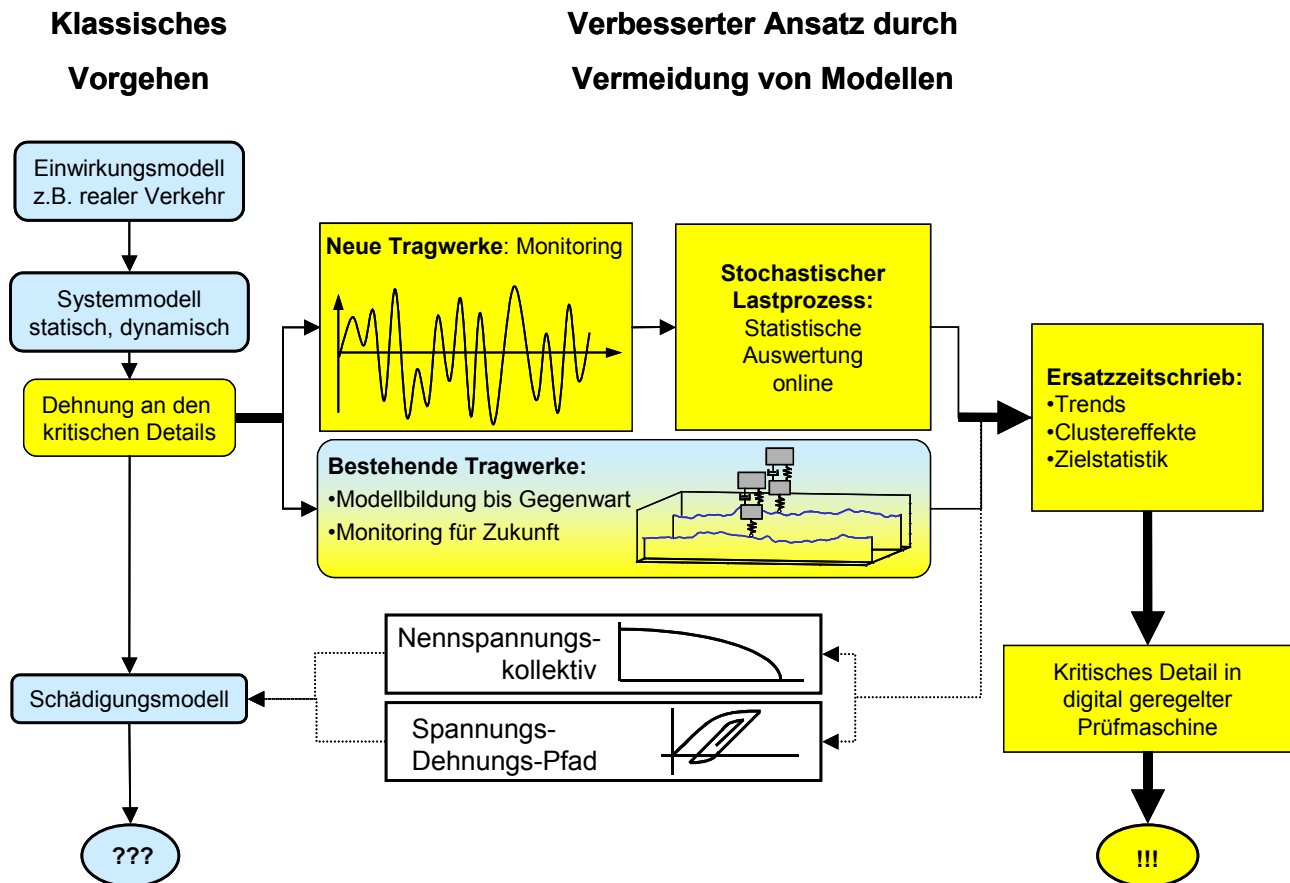


Abb. 3.1 Ablaufschema der klassischen Vorgehensweise im Vergleich zu der vorgestellten Methode

Bauwerke werden selten in Serie produziert. Jedes Bauwerk ist in der Regel hinsichtlich Ausführung und Belastung individuell. Die relativ lange Lebensdauer der Bauwerke und ihre zufallsartige Beanspruchung bedingt eine sehr komplexe Aufgabenstellung. Hier kann nicht einfach mit standardisierten betriebsähnlichen Beanspruchungs-Zeit-Funktionen, wie z.B. SAE-Histories [HAIB 89] und Tests an Prototypen gearbeitet werden. Da Bauwerke oder Bauteile i.a. nicht als Ganzes getestet werden können, müssen kritische Details geprüft werden. Diese sind kompliziert zu identifizieren, u.a. auch deshalb, weil sich die potentiellen Schadensorte durch örtliche Anrisse verlagern können. Die Größe von identifizierten kritischen Details (Knoten einer Fachwerkbrücke) macht ihre Prüfung als Ganzes oft unmöglich, so dass andere Strategien angewandt werden müssen. Bedingt durch die lange Standzeit und meist aggressive Betriebsbedingungen muss die Korrosion berücksichtigt werden (Tausalz bei Straßenbrücken oder Meerwasser bei Offshore-Konstruktionen). Aufgrund der großen Abmessungen ist der Einsatz korrosionsbeständiger Baustoffe aus Kostengründen nicht sinnvoll, im Maschinenbau dagegen häufig möglich. Schließlich zeigen Großbauteile oft beachtliche Eigenspannungszustände, die im Hinblick auf die Lebensdauerbestimmung berücksichtigt werden müssen [OHTA 95].

3.2 Anforderungen an die Vorgehensweise

3.2.1 Identifizierung der kritischen Details

Die Bestimmung der kritischen Details richtet sich nach der Art des Bauwerks. Schwachstellen älterer Konstruktionen sind meist bekannt und können deterministisch anhand von vorhandenen Berechnungen oder Nachrechnungen mittels üblicher Verfahren bestimmt werden. Bei neueren Konstruktionen hingegen ist das Sicherheitsniveau i.a. über alle Details des Bauwerks gleichmäßig hoch verteilt. In solchen Fällen können die kritischen Details auf probabilistischer Grundlage ermittelt werden, indem ihre Beiträge zur Gesamtversagenswahrscheinlichkeit betrachtet werden. Bei der Auswahl der Schwachstellen werden naturgemäß Modellvorstellungen für das Bauwerk benötigt. Ganz ohne Modelle bzw. ohne theoretische Betrachtungen kommt auch ein experimentelles Verfahren nicht aus.

3.2.2 Beanspruchungs-Zeit-Funktion

Die im Betrieb gemessenen Beanspruchungs-Zeit-Funktionen (oder Beanspruchungszeitreihen) könnten unmittelbar für einen Ermüdungsversuch im Labor verwendet werden, wenn das zufällig gemessene Beanspruchungsintervall repräsentativ für die Beanspruchung über die gesamte Nutzungsdauer des Bauwerks wäre (analog dem Betriebslasten-Nachfahrversuch). Wegen der Zufälligkeit der einwirkenden Lasten (Baustellenverkehr, Umleitungsverkehr etc.) und Langzeittrends in der Beanspruchung, die innerhalb der relativ langen Lebensdauer von Bauwerken i.d.R. auftreten, kann die zufällig gemessene Beanspruchungszeitreihe nicht für die gesamte Nutzungsdauer repräsentativ sein.

Daher werden synthetische Beanspruchungszeitreihen generiert, die alle wesentlichen Eigenschaften, wie z.B. Reihenfolge der Beanspruchungen, Korrelationen und Clusterbildungen (z.B. durch Lkw-Kolonnen) und erwartete Trends erfassen.

Die Reihenfolge der Beanspruchung ist für die Lebensdauer deshalb wichtig, weil sich durch die Überlastung an Kerben bzw. eingeleiteten Rissen ein günstiger Eigenspannungs-, Riss-schließ- bzw. Verfestigungszustand einstellen kann, der die weitere Schädigung bzw. den Rissfortschritt bei kleineren Beanspruchungsamplituden zunächst stark reduziert. Abb. 3.2 stellt den Spannungsverlauf im Kerbgrund einer Rundprobe nach zwei verschiedenen Schwingspielkonstellationen und die daraus resultierenden örtlichen Plastizierungsvorgänge schematisch dar. Der im Kerbgrund günstig wirkende Eigenspannungszustand kann sich abhängig von den folgenden Belastungsverhältnissen durch einen einzigen oder durch mehrere Lastwechsel abbauen bzw. sogar umkehren. Bei einer regello- sen Belastung ändern sich die Eigenspannungsverhältnisse im Kerbgrund ständig, so

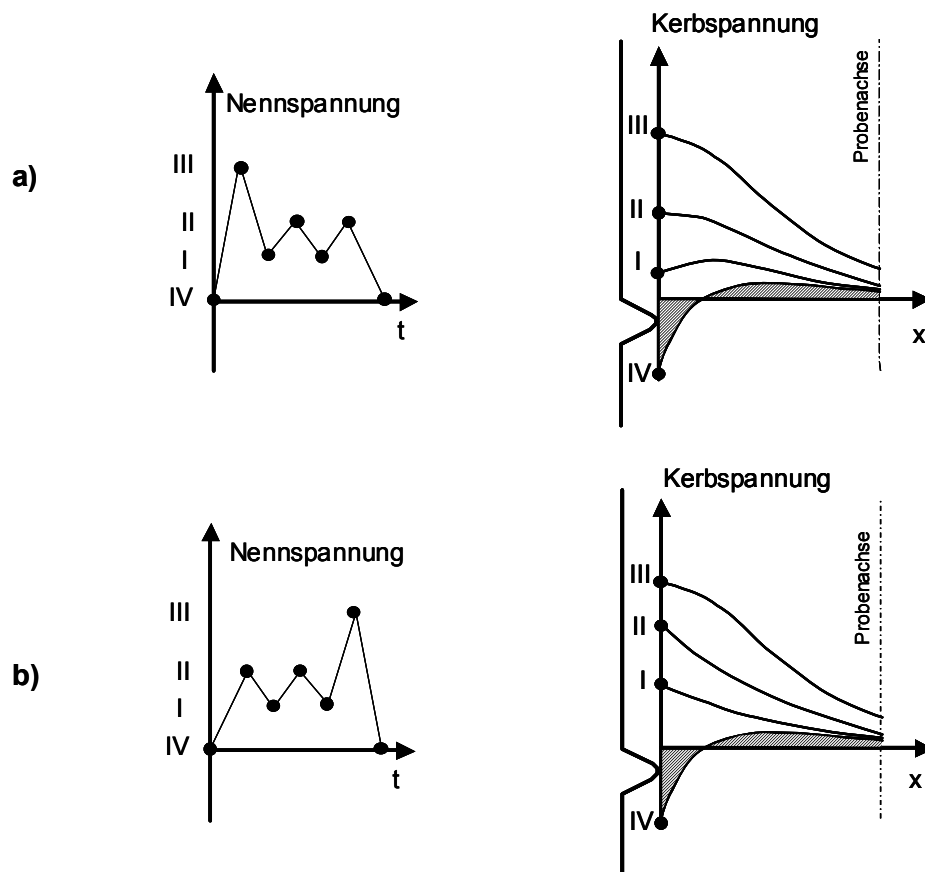


Abb. 3.2 Ablauf der Spannungsschwingspiele im Kerbgrund in Abhängigkeit von der Belastungsreihenfolge. Fall a) u.U. viel günstiger als b) hinsichtlich Ermüdung.

dass ihre exakte Verfolgung unter realem Werkstoffverhalten kaum möglich ist. Daher müssen bei der Generierung synthetischer Beanspruchungs-Zeit-Funktionen die Reihenfolgen beachtet werden. Mit den Reihenfolgen eng verknüpft ist das Muster, nach dem die Gruppen von Schwingspielen einander folgen wie z.B. das geclusterte Auftreten der Lasten. Wie in Abs. 4.5 gezeigt wird, kann die Verwendung einer synthetischen Beanspruchungszeitreihe, welche die realen Reihenfolgen nicht hinreichend genau wiedergibt, eine beachtliche Konsequenz auf das Lebensdauerergebnis haben.

In der Regel wird der Straßenverkehr simuliert, indem Gewichte und Fahrzeugabstände nach bekannten Verteilungen generiert werden. Es wird dann ein wanderndes Verkehrsband erzeugt, mit dem ein Modell des Bauwerks belastet wird ([SCHÜ 91], [GEIS 95], [BOGA 99], [MENS 00]). Diese Modelle sind zur Gewinnung von Beanspruchungskollektiven geeignet. Da bei der Erstellung von Kollektiven die Reihenfolgen eine untergeordnete Rolle spielen, darf die Fahrzeugfolge als zufälliges Ereignis betrachtet werden. Bei der Generierung synthetischer Beanspruchungszeitreihen muss genauer als beschrieben vorgegangen werden.

Eine andere Methode, die üblicherweise zur Simulation von Naturbelastungen wie Wellen oder Wind eingesetzt wird, ist die analoge bzw. digitale Generierung von stationären Zu-

fallsprozessen [HAIB 89]. Beanspruchungen aus dem Straßenverkehr, dem Arbeitsprogramm einer Maschine oder Zugüberfahrten (vgl. Abb. 4.13) liefern Messschriebe mit deterministischen Ereignisanteilen bzw. Messschriebe, welche als Folgen zufälliger Ereignisse zu betrachten sind. Wird eine derartige Beanspruchung über ein langes Betriebsintervall in ihrer Gesamtheit als ein quasi stationärer Zufallsprozess betrachtet und dementsprechend eine zufällige Beanspruchungs-Zeit-Funktion generiert, kann diese das gleiche Beanspruchungskollektiv wie die gemessene Beanspruchungszeitreihe zeigen [FISC 77]. Die Reihenfolgen entstehen dabei jedoch stochastisch und entsprechen nicht denen der realen Beanspruchung.

Die Entwicklung von Verfahren zur Generierung geeigneter synthetischer Beanspruchungszeitreihen bildet einen Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Die Verfahren werden in Kapitel 4 ausführlich behandelt.

Bei neuen Bauwerken lassen sich synthetische Beanspruchungszeitreihen ausgehend von Messdaten generieren. Zur Restlebensdauerbestimmung bereits bestehender Bauwerke werden die Beanspruchungszeitreihen aus der Vergangenheit benötigt. Diese liegen naturgemäß nicht vor. Sie können aber, wie später gezeigt wird, aus einer bereits bekannten Einwirkungsstatistik der Vergangenheit mittels geeigneter Algorithmen und mit Hilfe eines kalibrierten Systemmodells realitätsnah generiert werden.

3.2.3 Möglichkeiten der Trenderfassung

Bei vielen Bauwerken, insbesondere bei Straßenbrücken, ist es nicht möglich, vorab eine zuverlässige Angabe über die zu erwartenden Beanspruchungen zu machen bzw. für die Messung ein geeignetes Intervall zu finden, das repräsentativ für die gesamte Standzeit ist. Beispiele sind: BAB A2 Hannover – Berlin vor und nach 1990, eine Kiesgrube in der Umgebung wird eröffnet oder geschlossen, neue Industriegebiete werden erschlossen etc. Hierzu kommen noch die Änderungen des Verkehrsaufkommens (vgl. z.B. [SCHÜ 91]).

Sämtliche auftretende Ereignisse und Langzeittrends können nur erfasst werden, wenn die Messung am Bauwerk während der gesamten Standzeit kontinuierlich läuft. Die ausgewerteten Daten werden in einem "elektronischen Brückenbuch" festgehalten und können dann zur Lebensdauerbestimmung berücksichtigt werden. Ein solches Vorgehen steigert die Zuverlässigkeit der Lebensdauerprognose erheblich.

Um alle erfassten Informationen berücksichtigen zu können, sind zwei unterschiedliche Vorgehensweisen möglich:

A) Adaptive Trenderfassung

Die Laborversuche erfolgen etappenweise mit adaptiv an die messtechnisch erfassten Informationen angepassten synthetischen Beanspruchungszeitreihen (vgl. Abb. 3.3). Es werden zunächst nur einige Jahre der Zukunft im Labor simuliert. Die verwendete synthetische Beanspruchungszeitreihe berücksichtigt zunächst nur den bis zum Versuchszeitpunkt beobachteten Trend, der in Abb. 3.3 durch die Tangenten an der Kurve "Ermüdungszustand Bauwerk" dargestellt ist. Die Probe wird im Versuch nicht bis zum Bruch gefahren, sondern bis sie einen z.B. fünfjährigen Ermüdungszustand erreicht hat. Mit "Probe" ist hier ein Set von Proben gemeint, das zur statistischen Absicherung erforderlich ist. Wenn die Probe hierbei keinen Anriss zeigt, ist auch das zugehörige Bauwerk bis zu diesem Zeitpunkt hinreichend sicher. Anschließend wird die Probe verwahrt, wenn möglich, in der nächsten Umgebung des Bauwerks, um sie denselben Umwelteinflüssen auszusetzen. Nach Ablauf der bereits geprüften 5 Jahre wird der Versuch fortgesetzt. Inzwischen liegen neue Daten über die Belastung des Bauwerks vor, so dass vor dem Fortsetzen des Versuchs die Ermüdungszustände der Probe und des Bauwerks verglichen und falls nötig angepasst werden können (in Abb. 3.3 dargestellt durch die vertikalen bzw. horizontalen Pfeile). Hierbei dient die Anzahl der beobachteten Lastwechsel am Bauwerk und an der Probe jeweils als Maß der Schädigung.

Mit dieser Vorgehensweise wird die Lebensdauer der Brücke in verhältnismäßig kleinen Schritten, dafür aber sehr genau abgeschätzt. Weitere Vorteile dieser Methode sind die relativ kurze erforderliche Versuchsdauer und die Tatsache, dass jeweils nur ein Set von Proben benötigt wird, welches bei neuen Bauwerken sogar von demselben Schweißer mit entsprechender "Handschrift" aus denselben verwendeten Werkstoffen angefertigt werden kann.

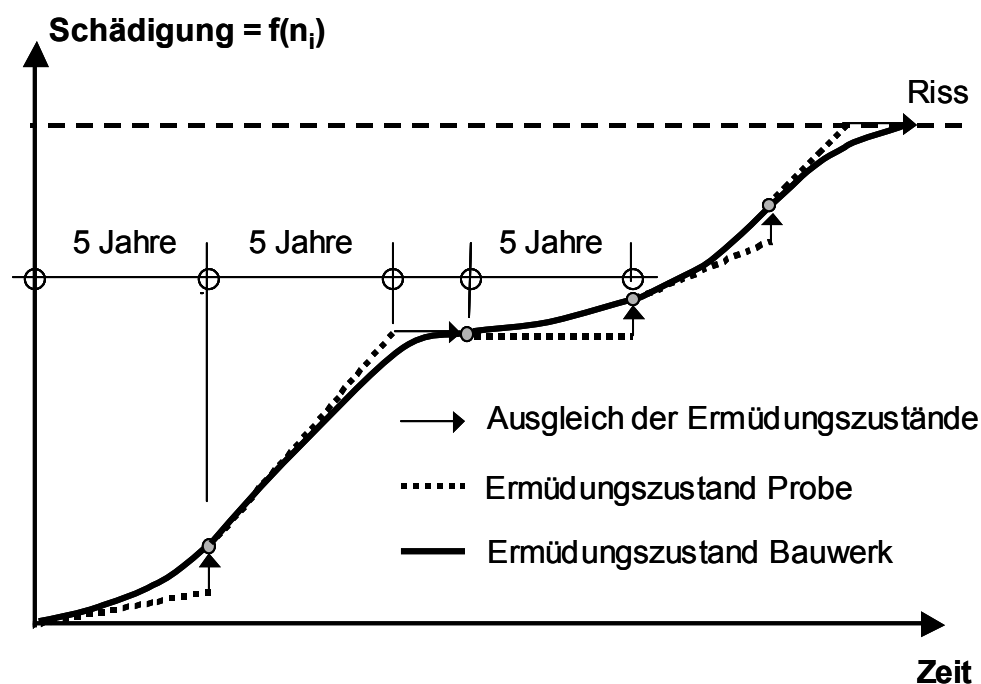


Abb. 3.3 Adaptive Trenderfassung durch Update der Ermüdungszustände

B) Iterative Trenderfassung

Zunächst wird unter Berücksichtigung des beobachteten Trends eine synthetische Beanspruchungszeitreihe für die gesamte Nutzungsdauer des Bauwerks generiert und dafür die Lebensdauer ermittelt (vgl. Abb. 3.4 Extrapolation Nr. 1). Bei Veränderungen des Verkehrsaufkommens ändert sich die Beanspruchungsstatistik. Diese Änderung wird im Zuge der kontinuierlichen Datenauswertungen erkannt und es werden neue synthetische Beanspruchungszeitreihen generiert, die das neue Verhalten erfassen. Eine neue synthetische Beanspruchungszeitreihe wird im Verhältnis der unterschiedlichen Einwirkungszeiträume (vgl. Abb. 3.4 " ΔT_i ") aus den jeweiligen beobachteten Beanspruchungszeitreihen und Trends zusammengesetzt. Die Lebensdauer wird erneut für die neue synthetische Beanspruchungszeitreihe bestimmt, wobei der aktuelle Trend bis zum Ende der Lebensdauer zugrundegelegt wird. Diese Prozedur würde wiederholt werden, wenn sich die Beanspruchungsstatistik anders als angenommen entwickelt und dieses durch Datenauswertungen erkannt wird (vgl. Abb. 3.4 "Trendwechsel => Update").

Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass nach jedem Versuch ein Anhaltswert für die gesamte Lebensdauer des Bauwerks gewonnen werden kann. Dadurch lassen sich beispielsweise Verkehrsentwicklungen, welche sich langfristig gesehen auf die Brücke unverhältnismäßig schädigend auswirken, früh erkennen. Derartigen Verkehrsentwicklungen kann dann rechtzeitig durch Maßnahmen wie Geschwindigkeits- bzw. Achslastbeschränkungen, hochwertigere Fahrbahnbeläge, bessere Fahrbahnübergänge etc. entgegengesteuert werden. Diesem Vorteil steht naturgemäß der Nachteil gegenüber, dass die Probe (das Proben-Set) jeweils bis zum Bruch gefahren wird, so dass mehrere Proben vorliegen müssen. Die Anzahl der erforderlichen Proben steht zu Beginn nicht fest, nach Abb. 3.4

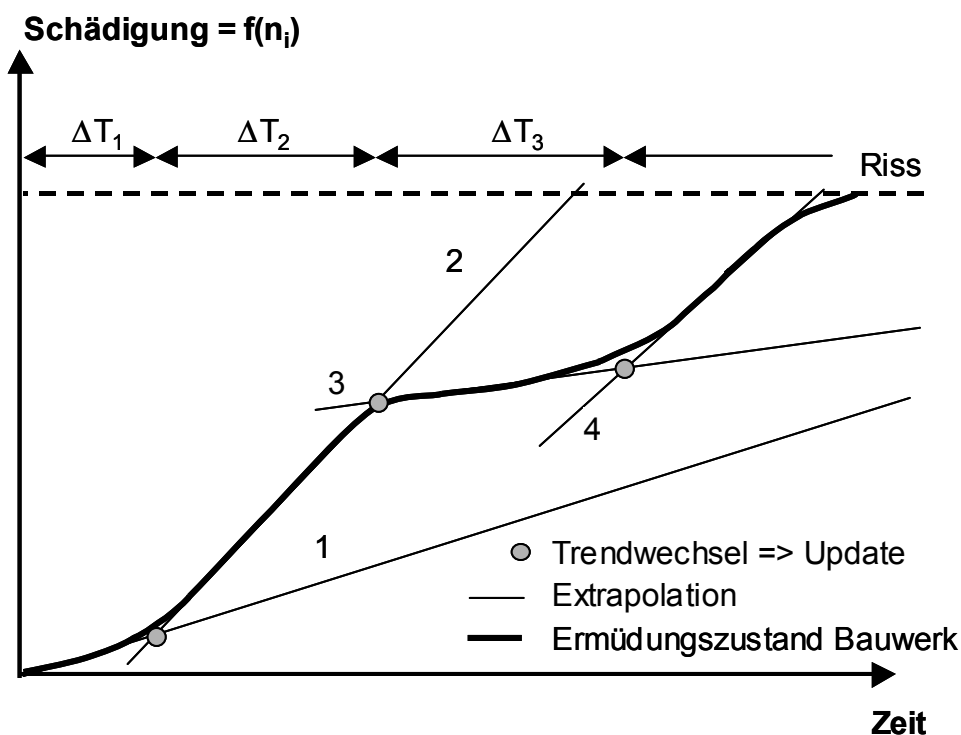


Abb. 3.4 Iterative Trenderfassung durch lineare Extrapolation auf die Lebensdauer

werden beispielsweise 4 Proben benötigt. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass u.U. lange Versuchszeiten entstehen können (vgl. Abb. 3.4 Extrapolationen Nr.1 und Nr.3).

3.2.4 Proben der kritischen Details

Die Lebensdauer wird wie erwähnt an einem Proben-Set ermittelt, das ein ähnliches Ermüdungsverhalten aufweisen muss wie das kritische Detail des Bauwerks. Daraus ergibt sich die Aufgabenstellung, dass bei beiden Systemen "Bauwerk" und "Probe" auf weitreichende Übereinstimmungen in den wichtigsten die Lebensdauer beeinflussenden Faktoren zu achten ist. Neben dem Werkstoff und dem gewählten Fertigungsverfahren ist die Kerbschärfe als Folge der Verarbeitung oder der Struktur maßgebend. Durch gleiche Kerbschärfen soll gewährleistet werden, dass die Beanspruchungsverhältnisse im Kerbgrund und dessen nächster Umgebung beim Bauwerk und bei der Probe möglichst identisch sind. Um unterschiedlich große Stützwirkungen der nicht plastizierten Bereiche in der Umgebung des jeweiligen Kerbgrunds zu vermeiden, ist auf gleich große Dehnungsgradienten zu achten. Die Form der Proben ist also derart zu bestimmen, dass die Beanspruchung in der nächsten Umgebung der Anrissstelle der Beanspruchung des Bauwerksdetails entspricht. Um statistische Größeneinflüsse aufgrund unterschiedlicher höchstbeanspruchter Volumina zu vermeiden, müssen die Proben in gleichen Materialdicken bzw. mit gleichen Schweißnahtvolumina gefertigt sein wie die Originalteile.

3.2.5 Validierung durch Ersatzbauwerke

Da die prognostizierte Lebensdauer eines realen Bauwerks relativ groß ist, ergeben sich Probleme bei der Validierung angewandter Vorgehensweisen, d.h. die Schadensprognose lässt sich am realen Bauwerk nicht unmittelbar bestätigen. Unabhängig davon kann die Untersuchung einiger weniger Bauwerke nicht die für eine Validierung erforderliche Bandbreite an Lastprozessen und Kerbdetails abdecken.

Daher werden die Bauwerke ersatzweise ins Labor verlegt. Diese sog. Ersatzbauwerke weisen ähnliche Kerben und Belastungssituationen wie ein reales Bauwerk auf, mit dem Unterschied, dass man nicht auf die zufällige Belastungssituation eines realen Bauwerks beschränkt ist, sondern Belastungssituationen und Kerbfälle im Labor definiert vorgeben kann: Schmalband- und Breitbandprozesse sowie Low-Cycle und High-Cycle Fatigue sind beliebig und stufenlos einstellbar, so dass ein breites Parameterfeld untersucht werden kann.

Durch die ständige, zeitlich geraffte Belastung ist die Lebensdauer eines Ersatzbauwerks erheblich kürzer als die Lebensdauer eines realen Bauwerks. Die an den kritischen Nachweisorten der Ersatzbauwerke auftretenden Beanspruchungen werden "gemonitored". In

einer Prüfmaschine werden dann die daraus gebildeten synthetischen Beanspruchungszeitreihen auf Proben aufgebracht, welche die lokalen Details präzise wiedergeben. Anhand von Lebensdauerversuchen an diesen Proben wird dann die Lebensdauer der Ersatzbauwerke prognostiziert.

4 Ermittlung synthetischer Beanspruchungszeitreihen

4.1 Allgemeines

Um ein zuverlässiges Ergebnis zu erhalten, sind aus den erwähnten Gründen bei der experimentellen Lebensdauerbestimmung von Bauwerken auf Dauermessungen basierende synthetische Beanspruchungszeitreihen einzusetzen. Nachfolgend wird die Vorgehensweise bei der Generierung solcher Zeitreihen vorgestellt. Die erforderlichen Teilschritte

1. Datenerfassung durch in-situ Messungen (Abs. 4.2)
2. Datenauswertung (Abs. 4.3) und
3. Generierung synthetischer Beanspruchungszeitreihen (Abs. 4.4)

werden näher erläutert. Abschließend wird die Eignung synthetisch generierter Beanspruchungszeitreihen für die Lebensdauerbestimmung rechnerisch und experimentell untersucht.

4.2 Datenerfassung durch in-situ Messungen

4.2.1 Beschreibung der Messeinrichtung

Um realistische Lasteinwirkungen zu erfassen und diese statistisch auszuwerten, wurde eine eigens konzipierte Messanlage gebaut und an verschiedenen Objekten installiert. Die gemessenen Rohdaten sollten vor Ort "online" ausgewertet werden. Sind die Auswerteverfahren jedoch kompliziert und aufwendig sowie die erforderlichen Abtastraten für die Messung hoch, steigen die Anforderungen an die Prozessorleistung, Messung und Auswertung parallel zu bewältigen. Dieses Problem wurde umgangen, indem die Messanlage aus zwei Rechnern zusammengestellt wurde, einem "Messrechner" und einem "Auswerterechner". Die Rohdaten werden nach dem Ablauf eines Messzyklusses (z.B. täglich) von dem Messrechner an den Auswerterechner übertragen. Sofort im Anschluss daran erfolgt die Übergabe einer Parameterdatei an den Messrechner, in der die Messaufgabe für den nächsten Messzyklus definiert ist. Während der Messrechner die Messung fortsetzt, werden parallel durch den zweiten Prozessor (Auswerterechner) die Rohdaten vor Ort ausgewertet. Der Auswerterechner steht in der übrigen Zeit für andere Dienste, wie z.B. Modemanrufe vom Büro aus zur Überwachung oder zur Steuerung des Messablaufs zur Verfügung. Abb. 4.1 stellt das Konzept der Messanlage schematisch dar.

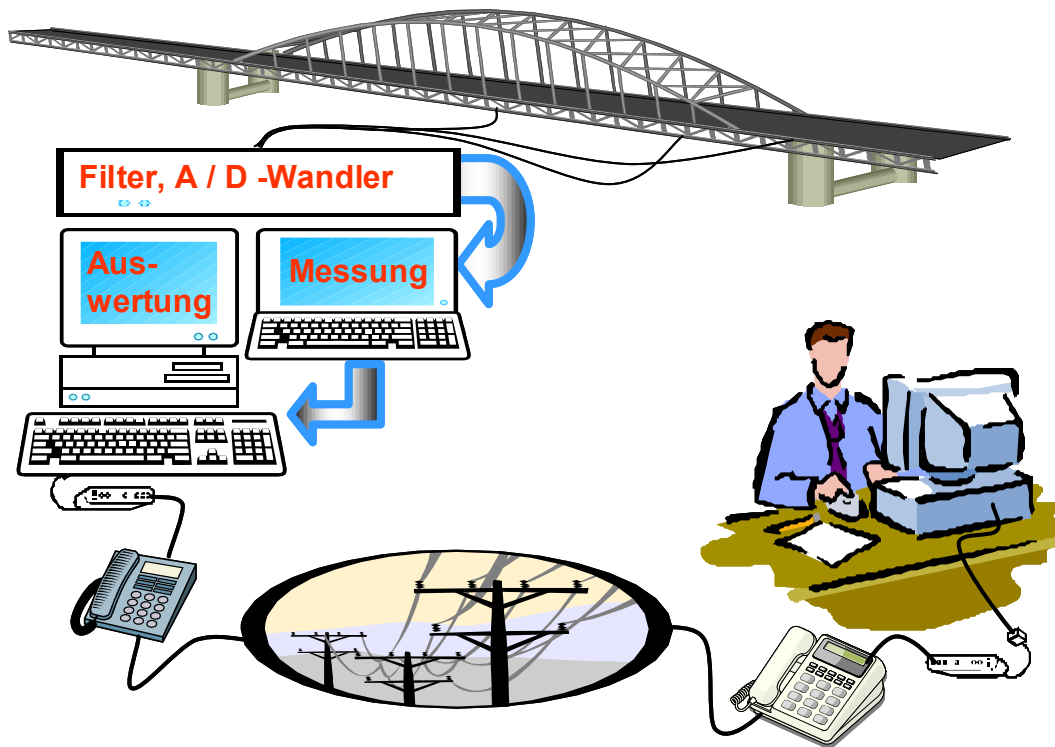


Abb. 4.1 Konzept der Messanlage mit zwei parallel arbeitenden Rechnern und Fernüberwachung

4.2.2 Autobahnbrücke Braunschweig-Wenden

Zunächst wurden Messungen an einer Straßenbrücke im Zuge der BAB A2 (Abschnitt Hannover - Berlin) über den Mittellandkanal bei Braunschweig-Wenden durchgeführt (Abb. 4.2). Dabei handelt es sich um eine Trogbrücke für jede Fahrbahn, bestehend aus Kasten-Hauptträgern und Querträgern, die in Verbund mit der Fahrbahnplatte sind (Abb. 4.3). Wegen des im Verhältnis zu den Verkehrslasten relativ hohen Eigengewichts konnte die Brücke nach ersten Untersuchungen aus ermüdungstechnischer Hinsicht nicht als kritisch bewertet werden [PEIL 97]. Ein Ausschnitt der Beanspruchungszeitreihe von einer Messstelle am Hauptträger ist in Abb. 4.4 dargestellt.

Inzwischen wird die Brücke im Zuge der Verbreiterung der BAB A2 durch eine neue ersetzt. Im Sommer 2002 werden voraussichtlich die Messungen an dem neuen Bauwerk vor der Verkehrsfreigabe gestartet. Die Applikation der DMS und die Positionierung der Sensoren kann in diesem Fall während des Bauzustands erfolgen, was für die Instrumentierungsarbeiten einen erheblichen Vorteil bedeutet.



Abb. 4.2 BAB - Brücke über den Mittellandkanal bei Braunschweig-Wenden

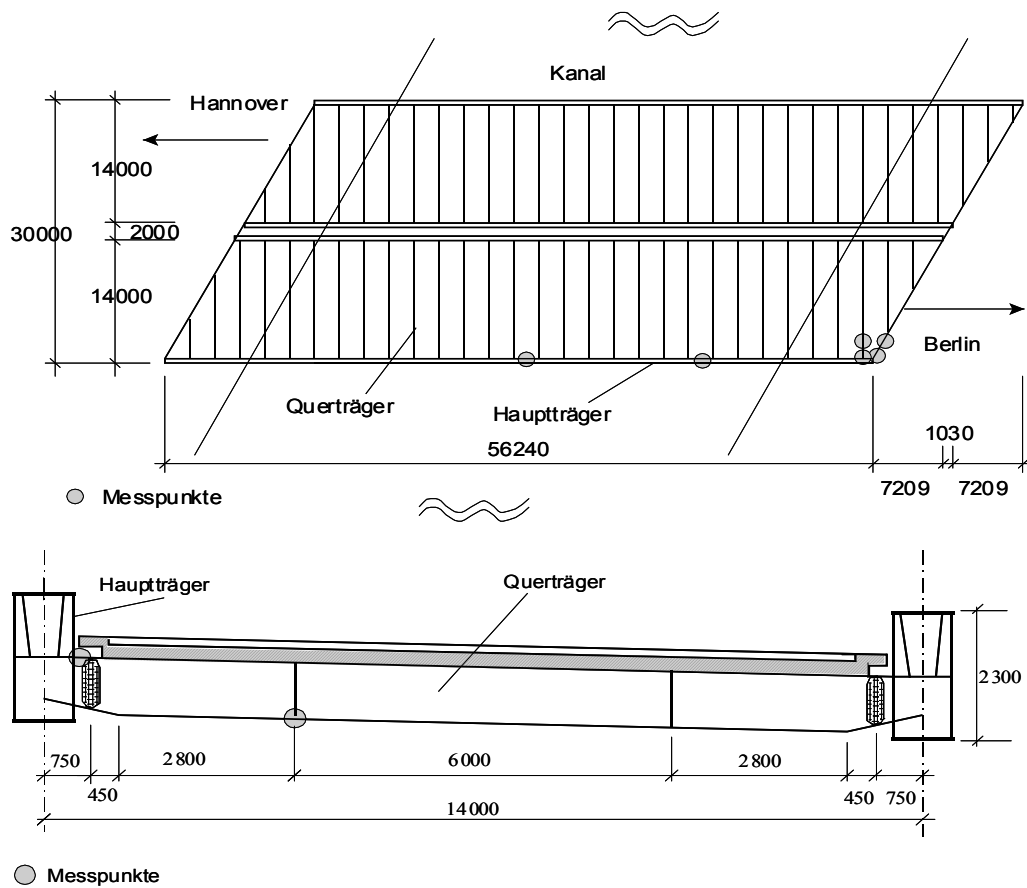


Abb. 4.3 System und Querschnitt der untersuchten Autobahnbrücke

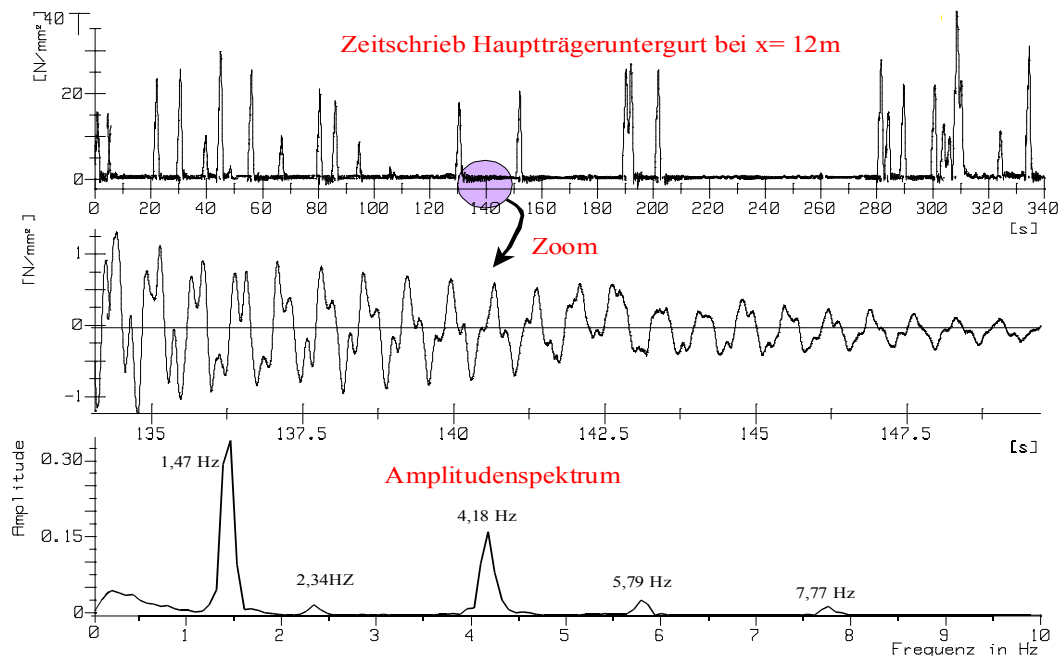


Abb. 4.4 Ausschnitt einer Messung

4.2.3 Eisenbahnbrücke Sülfeld bei Wolfsburg

Seit einiger Zeit werden Messungen an einer neuen Fachwerk-Eisenbahnbrücke durchgeführt (Abb. 4.5). Die Brücke ist ein Kreuzungsbauwerk über den Mittellandkanal im Verlauf der Ausbaustrecke Hannover - Berlin. Die Verkehrslastspannungen, insbesondere im Bereich der Fahrbahn, sind bei dieser Brücke deutlich größer als bei der o.a. Straßenbrücke,



Abb. 4.5 Eisenbahnbrücke an der Schleuse Sülfeld bei Wolfsburg

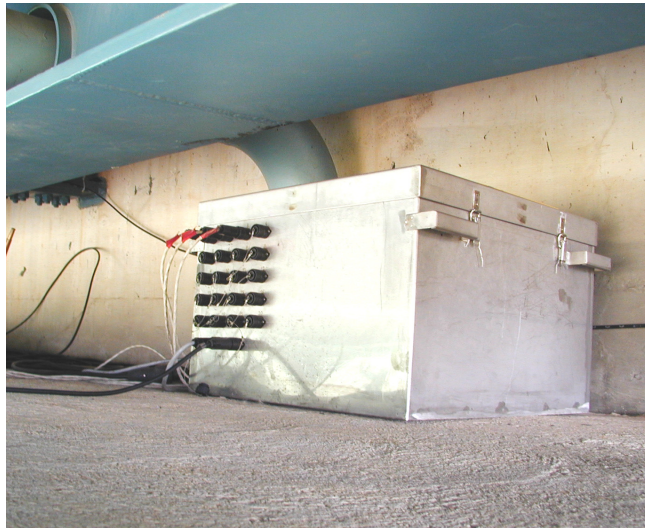


Abb. 4.6 Messanlage im wasserdichten Gehäuse auf dem Brückenwiderlager

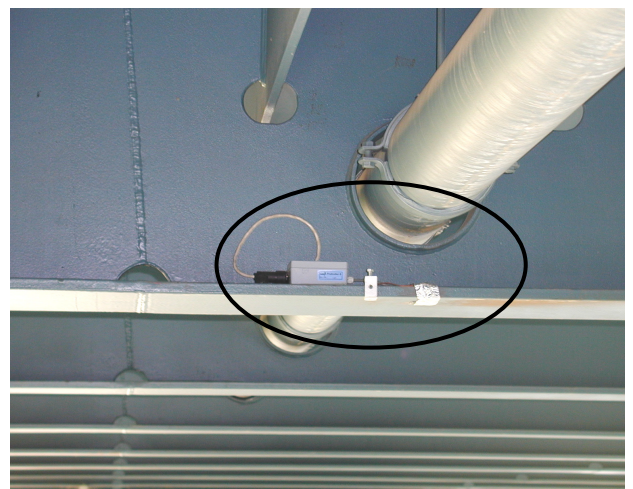
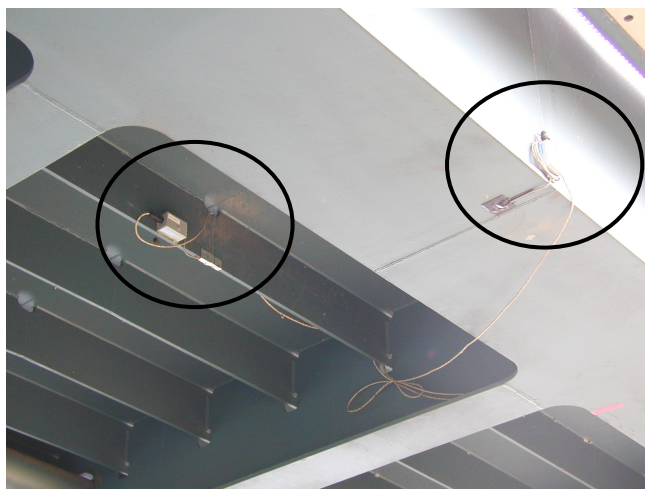


Abb. 4.7 Spannungsvorverstärker an verschiedenen Messstellen. Links: am Stoß einer Fahr-
bahnrippe und am Stoß der Hauptträger. Rechts: Untergurt des Querträgers am Auflager; der
Querschnitt ist hier durch den Durchlass stark geschwächt.

so dass für viele Konstruktionsdetails der Ermüdungsnachweis für die Bemessung maß-
gebend wird. Da hier im Gegensatz zu der Autobahnbrücke konstruktionsbedingt die Mög-
lichkeit der geschützten Aufnahme der Messtechnik im Brückenkörper fehlt, ist der
Gesamtaufwand etwas größer. Abb. 4.6 zeigt das auf einem Brückenwiderlager
angeordnete wasserdichte Stahlgehäuse, in dem die Messanlage untergebracht ist.

In Abb. 4.7 sind einige Messpunkte dargestellt. Ausschnitte aus Messschrieben dieser
Punkte sind in Abb. 4.8 und 4.9 zu sehen. Der Messzyklus für einen neuen Tag beginnt
um 4:00 Uhr, da dieser Zeitpunkt für eine Messunterbrechung zur Datenübergabe an den
Auswerterechner wegen geringer Verkehrsbelastung gut geeignet ist. Gemäß dem Tages-
schrieb in Abb. 4.8 ist ca. 30.000 Sekunden nach Messbeginn, also gegen Mittag, der Ein-
fluss der Temperaturbeanspruchung am größten. Wegen der zeitlich gestauchten Darstel-
lung ist in Abb. 4.8 jede Zugüberfahrt nur als eine senkrechte Linie erkennbar. In der Ver-
größerung ist eine Zugüberfahrt gesondert dargestellt (Abb. 4.9).

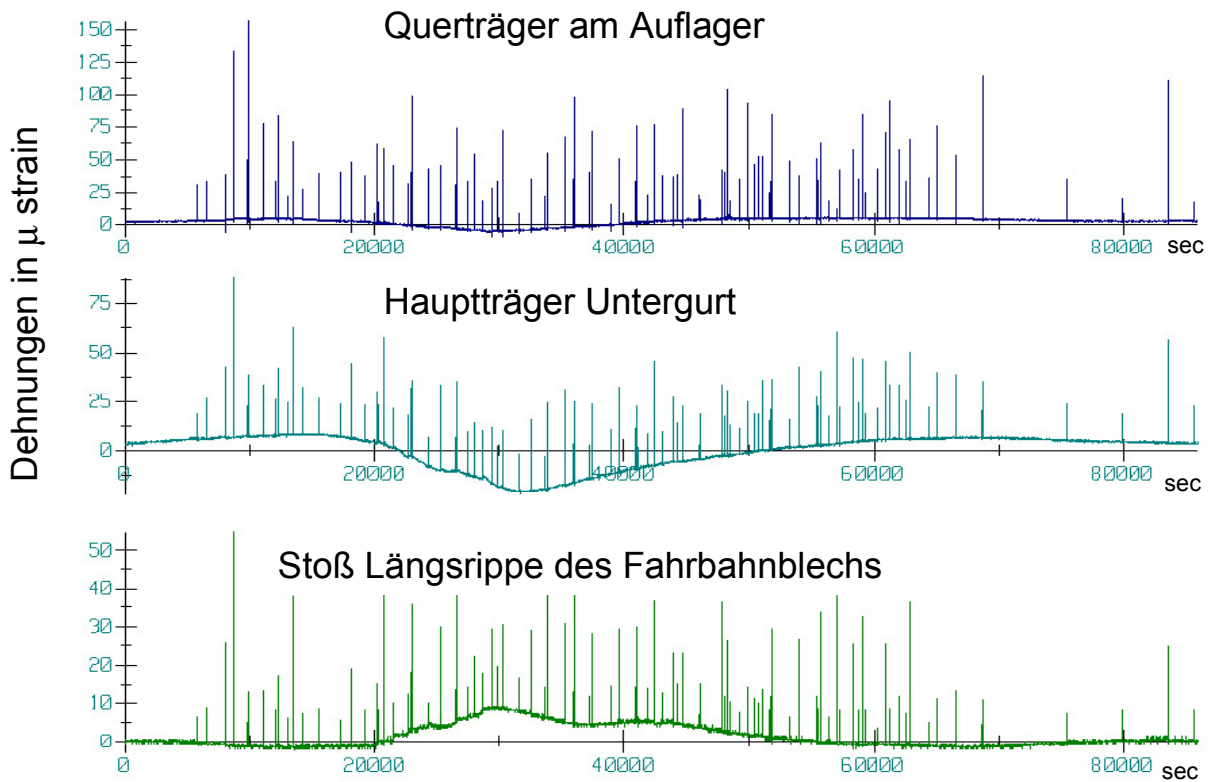


Abb. 4.8 Ein Tagesschrieb. Beginn des Tages: 4:00 Uhr

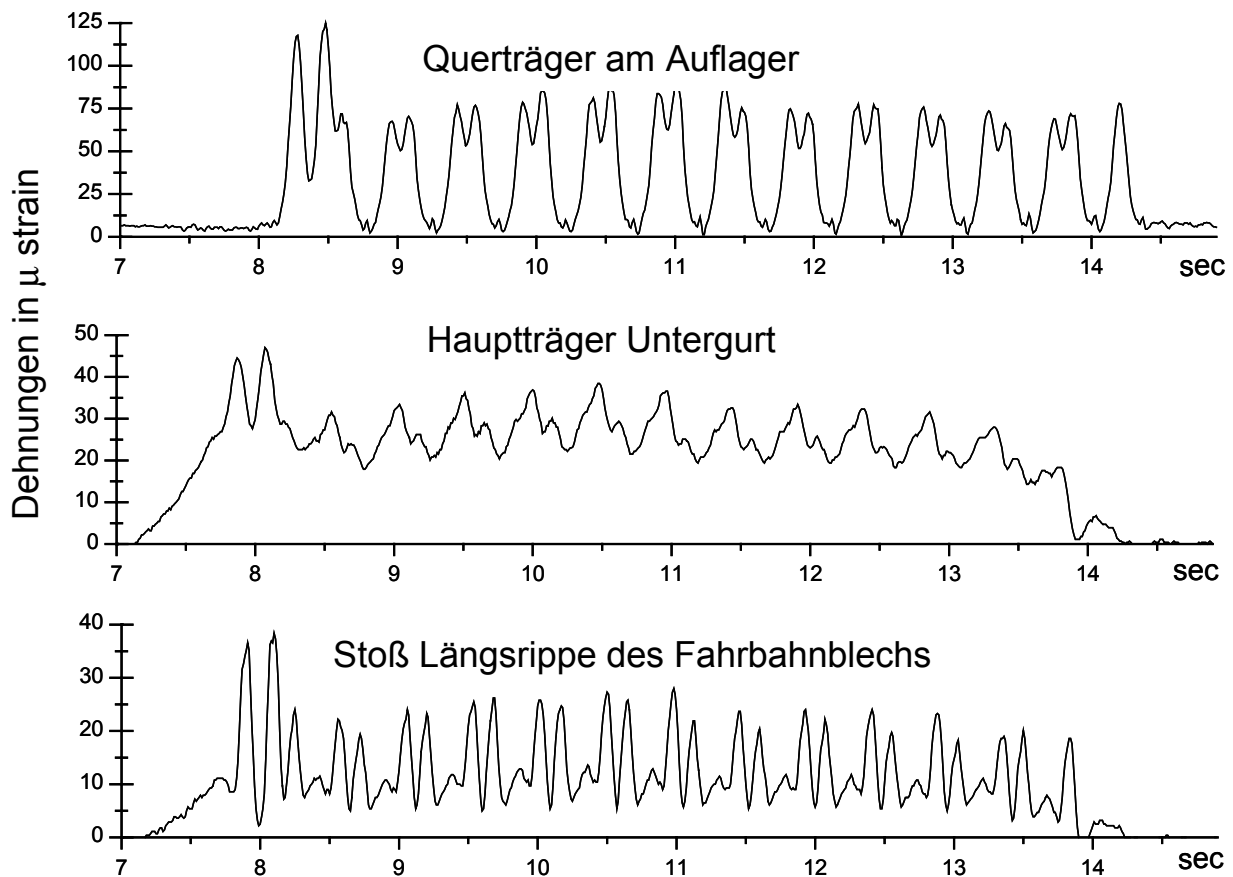


Abb. 4.9 Signale während einer Zugüberfahrt

4.3 Datenauswertung

4.3.1 Allgemeines

Ziel der Auswertung ist die Gewinnung von statistischen Informationen aus den Messschrieben zur Rekonstruktion des Belastungsszenarios des Bauwerks durch eine synthetische Beanspruchungszeitreihe. Dabei sind neben den Häufigkeiten und Größen auch die Reihenfolgen der Lasten und u.a. deren zeitliche Abstände von Interesse. Die entwickelten und programmtechnisch realisierten Auswerteroutinen extrahieren aus den Messschrieben folgende Informationen, auf die in den folgenden Abschnitten näher eingegangen wird:

- Clustermatrix,
- Matrix der Übergänge (multi level),
- Zeitreihen von identifizierten Fahrzeugtypen,
- Matrix der Zeitlücken zwischen Fahrzeugtypen,
- Matrix der Aufeinanderfolge von Fahrzeugtypen und
- Matrix der Aufeinanderfolge von Umkehrpunkten.

Zu Vergleichszwecken wurden außerdem Routinen programmiert, welche eine Auswertung von Beanspruchungszeitreihen nach der Rainflow-Methode und eine Schadensberechnung nach Eurocode 3 ermöglichen.

Je nach Anwendungsfall - neues Bauwerk oder bestehendes Bauwerk - werden die oben genannten Informationen allein oder kombiniert zur Generierung der synthetischen Beanspruchungszeitreihen eingesetzt.

Für die Auswertung muss die gemessene Beanspruchungs-Zeit-Funktion zunächst aufbereitet werden. Häufig kann das Auftreten eines Umkehrpunktes (Maximum oder Minimum) in der Beanspruchungs-Zeit-Funktion als schädigendes Ereignis interpretiert werden (Lastumkehr). Somit ist eine Darstellung der Beanspruchungs-Zeit-Funktion als Folge ihrer Umkehrpunkte (Reversals) für die Synthese einer stochastischen Beanspruchung in der Regel ausreichend. Dabei werden Informationen über den zeitlichen Verlauf der Beanspruchung (Sinus, Dreieck etc.) vernachlässigt und zur weiteren Vereinfachung kleine nicht schadensrelevante Peaks eliminiert, vgl. Abb. 4.10 Mitte. Durch diese Aufbereitung lässt sich die Datenmenge erheblich verkleinern und demzufolge leichter handhaben. In manchen Fällen kann sogar auf die Zeitinformation völlig verzichtet werden und die Beanspruchungs-Zeit-Funktion in eine Folge von Umkehrpunkten umgewandelt werden.

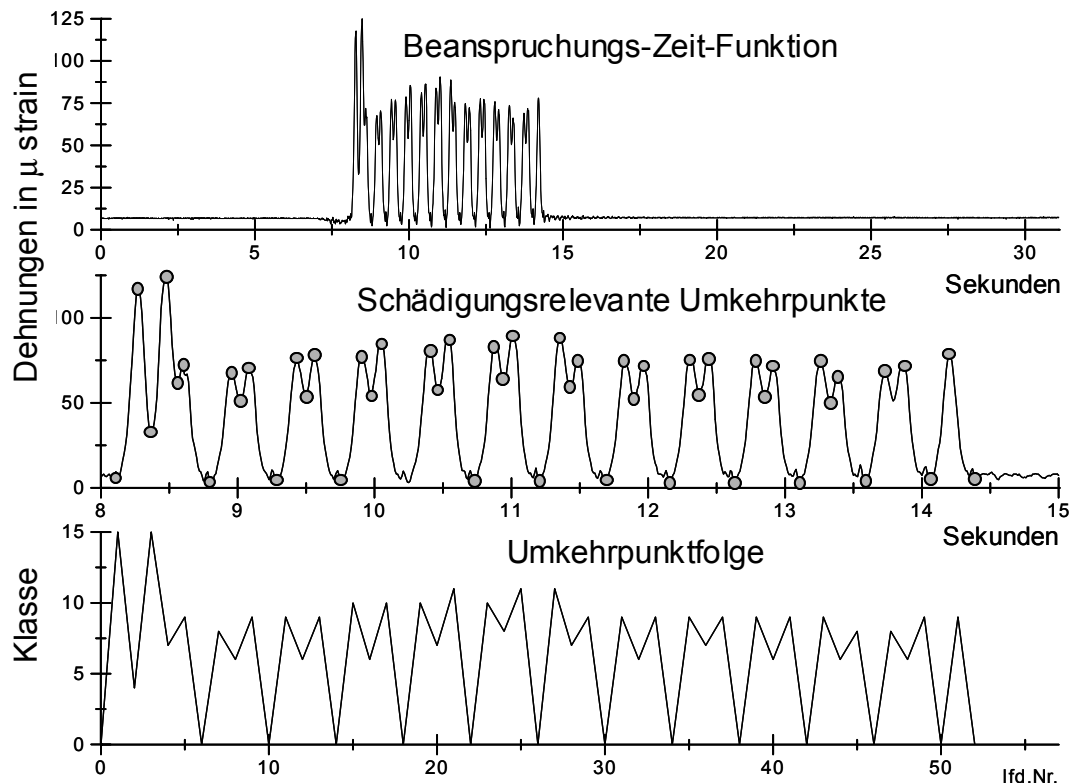


Abb. 4.10 Beanspruchungs-Zeit-Funktion als Folge von Umkehrpunkten

Die Lastumkehrpunkte werden außerdem nach einer Klassierung nur noch durch eine Klassennummer wiedergegeben (Abb. 4.10 unten).

Die aufbereiteten Beanspruchungszeitreihen werden u.a. mit Hilfe der Methoden der Clusteranalyse und Diskriminanzanalyse untersucht. Hierbei wird die Clusteranalyse zur Charakterisierung der Reihenfolgen eingesetzt und die Diskriminanzanalyse zur Identifizierung von Fahrzeugtypen anhand des Messsignals und zur Generierung synthetischer Beanspruchungszeitreihen.

Da im Bauwesen die Methoden der Clusteranalyse und Diskriminanzanalyse nicht zu den gängigen Verfahren zählen, erscheint es sinnvoll, sie hier zunächst in Grundzügen vorzustellen, da in den anschließenden Abschnitten die ausgewerteten statistischen Kennwerte auf diesen Verfahren basierend vorgestellt werden.

4.3.2 Grundzüge der Clusteranalyse und Diskriminanzanalyse

4.3.2.1 Allgemeines

Die Clusteranalyse und Diskriminanzanalyse sind statistische Verfahren. Sie sind einzuordnen unter den multivariaten Analysemethoden, welche allgemein als Datenstrukturenprüfende und Datenstrukturen-entdeckende Verfahren bekannt sind.

Das Spektrum des Anwendungsbereichs der Clusteranalyse und der Diskriminanzanalyse ist breit. Sie kommen hauptsächlich in der Medizin, Biologie, Archäologie, Wirtschaft, Psychologie, Soziologie sowie Kriminologie zum Einsatz. Dabei werden in der Regel zunächst unübersichtliche Datenmengen (sog. *Individuen* oder *Objekte*) durch *Klassifikation* transparent gemacht.

Da wir im alltäglichen Leben von einer Reihe von Klassifikationen bzw. Klassifikationsaufgaben begleitet werden (die Ordnung der Waren in einem Kaufhaus, das Sortieren von Büchern nach Inhalt in ein Regal etc.) und daher quasi eine gewisse Erfahrung auf diesem Gebiet besitzen, sind wir u.U. in der Lage, einige Klassierungsaufgaben intuitiv, ohne tiefergehende mathematische Kenntnisse der genannten statistischen Verfahren zu bewältigen. Eine methodische Aufschlüsselung der Vorgehensweisen in der Sprache der Mathematik und das Definieren von Begriffen fördern jedoch das Verständnis und erleichtern die Erörterung. Dadurch wird außerdem ein modularer Einsatz der Methoden ermöglicht, was zur Steigerung der Flexibilität und Verbesserungsfähigkeit führt. Ein weiterer Vorteil der methodischen Aufschlüsselung ist die Aufbereitung der Vorgehensweisen für einen rationalen Computereinsatz, ohne den eine Klassifikation großer Datenmengen nicht denkbar ist.

Nachfolgend sollen einige für die Beschreibung der Klassifikationsmethoden wichtige Begriffe eingeführt und anhand von Beispielen erläutert werden. Die zu klassierende *Objekte* können beispielsweise Bücher einer Bibliothek sein, Krankheitsfälle, Tierarten, historische Funde oder, wie in unserem Fall, Peaks in einer Beanspruchungszeitreihe oder Fahrzeuge, die eine Brücke befahren. Für jedes *Objekt* werden *Merkmale* (*Klassifikationsvariablen*) erhoben, welche das *Objekt* repräsentieren (Abb. 4.11). Es leuchtet ein, dass die *Merkmale* sachlich relevant für das Ziel der *Klassifikation* sein müssen. Die Merkmale eines Objekts werden als Komponenten zur Bildung eines Vektors verwendet, der als *Merkmalsvektor* oder *Klassifikationsvektor* dieses Objekts bezeichnet wird.

	Merkmal 1	Merkmal 2	...	Merkmal J
Objekt 1				
Objekt 2				
-				
-				
-				
Objekt K				

Abb. 4.11 Aufbau einer Rohdatenmatrix zur Erfassung von Objekten

$$\text{Merkmalsvektor}_{\text{Objekt } i} = \begin{pmatrix} \text{Merkmal } 1_i \\ \text{Merkmal } 2_i \\ \dots \\ \text{Merkmal } J_i \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Der Zustand bzw. der Istwert jeder Vektorkomponente (jedes Merkmals) wird als dessen *Ausprägung* bezeichnet. Eine bestimmte Kombination von Merkmalsausprägungen wird *Realisation* des Vektors genannt. *Objekte werden aufgrund der Realisation ihres Klassifikationsvektors klassifiziert.*

Der Begriff "*Klassifikation*" ist jedoch doppelsinnig:

Bei der Clusteranalyse (engl. cluster: Traube, Haufen) versteht man unter Klassifikation die Einteilung einer heterogenen Menge in homogene Klassen, deren Anzahl sowie Eigenschaften zunächst unbekannt sind. Die Diskriminanzanalyse (lat. discrimen: Unterschied, Entscheidung) versteht dagegen unter Klassifikation die Zuordnung eines Objekts zu einer der bereits vorhandenen, also bekannten Klassen.

4.3.2.2 Clusteranalyse

Ziel der Clusteranalyse ist das Auffinden von Klassen bzw. Gruppen unter Beachtung einer optimalen Homogenität innerhalb der Klassen und einer optimalen Heterogenität zwischen den Klassen. Nachdem die zu untersuchenden Objekte jeweils durch ihren Merkmalsvektor erfasst sind, kann eine Zusammenfassung ähnlicher Objekte unter Berücksichtigung ihrer Merkmale erfolgen, wodurch dann Cluster entstehen.

Hierzu wird zunächst die Ähnlichkeit aller möglichen Objektpaarungen in einer sog. *Distanzmatrix* durch *Proximitätsmaße* quantifiziert. Proximitätsmaße können *Ähnlichkeitsmaße* oder *Distanzmaße* sein, welche durch eine Zahl p_{ij} die Ähnlichkeit bzw. Unähnlichkeit von zwei Objekten i und j zum Ausdruck bringen. Abb. 4.12 stellt den Aufbau einer Distanzmatrix dar. Die Elemente dieser Matrix werden durch die Zahlen p_{ij} besetzt. In Abhän-

	Objekt 1	Objekt 2	...	Objekt K
Objekt 1				
Objekt 2				
-				
-				
Objekt K				

Abb. 4.12 Aufbau einer Distanz- oder Ähnlichkeitsmatrix

gigkeit des Skalenniveaus der betrachteten Merkmale (nominal, ordinal, metrisch etc.) ist eine Vielzahl von Proximitätsmaßen entwickelt worden (siehe z.B. [BACH 96]).

Mit Hilfe von sogenannten *Fusionierungsalgorithmen* (*Cluster-Algorithmen*) lassen sich dann Cluster entdecken, indem ausgehend von der Distanzmatrix ähnliche Objekte in Gruppen zusammengefasst werden. Die Fusionierungsalgorithmen werden jeweils vor dem Hintergrund einer konkreten Anwendungssituation gewählt. Auf ihre Behandlung wird hier nicht weiter eingegangen. Es wird lediglich der später in dieser Arbeit verwendete Algorithmus, das sog. graphentheoretische Verfahren, erläutert.

Das graphentheoretische Verfahren ist ein elementarer Cluster-Algorithmus mit direkt interpretierbarem Ergebnis, aber begrenzter Einsatzmöglichkeit: Bei maximal dreidimensionalen Merkmalsvektoren kann jedes Objekt als Punkt im dreidimensionalen Raum dargestellt werden. Dabei wird jedes Merkmal einer Achse zugewiesen. Um eventuelle Strukturen in den Daten zu erkennen, muss das dreidimensionale Gebilde von verschiedenen Richtungen betrachtet werden. Die Punktwolken in dem dreidimensionalen Gebilde identifizieren die Cluster. Der große Vorteil dieser Methode ist, dass die Eigenschaften der Cluster direkt auf den Koordinatenachsen abgelesen werden können.

Betrachtet man die Spitzenwerte eines aus dem Betrieb einer Brücke gemessenen Beanspruchungszeitreihe, können diese Spitzenwerte als eine Stichprobe von Objekten aufgefasst werden. Inwiefern eine Struktur in diesen Daten vorhanden ist, lässt sich durch eine geeignete Wahl von Merkmalen untersuchen. Hierbei sind die Vorteile des graphentheoretischen Verfahrens bei der anstehenden Generierung sehr nützlich.

4.3.2.3 Diskriminanzanalyse

Bei der Diskriminanzanalyse existieren im Gegensatz zur Clusteranalyse bereits fest vorgegebene Gruppen. Sie wird i.a. benutzt, um Gruppenunterschiede hinsichtlich einer Mehrzahl von Merkmalen zu untersuchen und die Eignung von Merkmalen zur Unterscheidung zwischen den Gruppen festzustellen.

Eine weitere Anwendung der Diskriminanzanalyse, die von unmittelbarer praktischer Relevanz ist und die ebenso in dieser Arbeit zum Einsatz kommt, ist die Prognose der Gruppenzugehörigkeit von Objekten. Es wird das Problem behandelt, ein neues Individuum aufgrund seiner Merkmale einer der vorhandenen Gruppen optimal zuzuordnen. Als Ergebnis der Klassifikation wird die Gruppenzugehörigkeit durch eine *Gruppenvariable* ausgedrückt. Anwendungsbeispiele für die Diskriminanzanalyse sind sehr häufig zu finden: In der Medizin bei der Stellung von Frühdiagnosen oder Prognosen aufgrund von Symptomen; in der Wirtschaft z.B. als Hilfsmittel zur Kreditwürdigkeitsprüfung [BULL 76]; in der Ar-

chäologie bei der Zuordnung von gefundenen Überresten oder Werkzeugen zu einem Volksstamm. Schließlich sei noch aus dem Bereich der Ingenieurwissenschaften die Arbeit von NEULAND zu nennen, in der eine Vorhersage von Rutschungen an Böschungen und Hängen gemacht wird, die auf einfach zu ermittelnden Variablen wie Hangneigung, Einzugsgebiet oberhalb der Untersuchungsstelle und einem Parameter für die Scherfestigkeit basiert [Neul 75].

Mit Hilfe der Diskriminanzanalyse werden u.a. Trennregeln aufgestellt, welche die Gruppen gegeneinander abgrenzen und Schätzwerte für die Wahrscheinlichkeiten von Fehlzuordnungen angegeben. Das prinzipielle Vorgehen der Diskriminanzanalyse besteht aus drei Schritten:

1. Im ersten Schritt wird an einer Anzahl von bekannten Objekten der Klassifikationsvektor *und* die Gruppenvariable erhoben. Man erhält eine sog. *erhärtete Stichprobe*. (Die Gruppen stehen dabei von vornherein fest !).
2. Anschließend wird eine *Zuordnungsregel (Diskriminanzfunktion)* entwickelt, mit der die bekannten Objekte allein aufgrund des Klassifikationsvektors einer der Gruppen zugeordnet werden können.
3. An neuen Objekten wird nur noch der Klassifikationsvektor erhoben und mit Hilfe der Zuordnungsregel ihre Gruppenzugehörigkeit bestimmt.

Die Zuordnungsregel gibt für jede Realisation des Klassifikationsvektors einen Schätzwert der Gruppenvariablen. Eine eindeutige Zuordnung eines Objekts zu einer Gruppe ist selbst bei der Wahl der "besten" Zuordnungsregel nicht immer möglich und das Objekt kann wegen seines mehrdeutigen Klassifikationsvektors falsch zugeordnet werden. In der Diskriminanzanalyse sind eine Reihe von Zuordnungsregeln entwickelt worden. Bei der Wahl bzw. Entwicklung einer Zuordnungsvorschrift ist der Anwender nicht an eine starre Vorgehensweise gebunden, vielmehr sind hierbei Sachlogik und die Berücksichtigung der konkreten Anwendungssituation gefragt. Man spricht von einer *optimalen Zuordnungsregel*, wenn es keine Zuordnungsregel gibt, für die der Anteil der falsch zugeordneten Individuen kleiner ist als mit der *optimalen Zuordnungsregel*.

In dieser Arbeit wird die Diskriminanzanalyse dazu verwendet, Fahrzeugtypen anhand des erzeugten Signals im Messschrieb zu identifizieren, indem sie einer Fahrzeugtypen-Gruppe zugeordnet werden. Weiterhin werden mit Hilfe der Grundregeln der Diskriminanzanalyse Reihenfolgestatistiken aus gemessenen Beanspruchungszeitreihen bei der Generierung synthetischer Beanspruchungszeitreihen berücksichtigt.

4.3.3 Kennwerte zur Generierung synthetischer Beanspruchungszeitreihen

4.3.3.1 Clustermatrix

Zunächst ist der Begriff "Cluster" hinsichtlich unserer Zielsetzung zu definieren. Beobachtet man den Verkehr auf einer Straßenbrücke rein optisch, so fallen dabei Lkw-Kolonnen auf, die als Cluster bezeichnet werden können. Gründe für die Kolonnenbildung durch Lkw's sind z.B. Fahren im Windschatten oder die Tatsache, dass sich auf anderen Fahrspuren viel schnellere Fahrzeuge befinden, so dass sich die langsameren Fahrzeuge (i.d.R. Lkw's) nur auf der rechten Spur aufhalten können und für sie kaum eine Überholmöglichkeit besteht.

In optischer Hinsicht besteht ein Cluster aus einer Kette von "großen" Fahrzeugen, welche einander in zeitlich geringen Abständen folgen. Damit stehen zunächst die für eine Clusteranalyse erforderlichen Parameter fest: Ein passierendes Fahrzeug ist das zu untersuchende Objekt, mit den Merkmalen Größe (Statur) und Zeitlücke, die verstreicht bis das nächste Fahrzeug ähnlicher Größe erscheint.

Im Sinne unserer Zielsetzung müssen beide Parameter jedoch modifiziert bzw. spezifiziert werden. In jeder Kolonne sind sehr leichte und sehr schwere Fahrzeuge ähnlicher Statur, die optisch nicht zu unterscheiden sind, aber die Brücke unterschiedlich beanspruchen. Die Art und der Zustand der Achsaufhängung und die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs beeinflussen ebenfalls die Beanspruchung der Brücke. Daher werden anstelle der Fahrzeuge die Extremwerte (Peaks) einer Beanspruchungszeitreihe als Objekte definiert und die Merkmale entsprechend gewählt. Als Cluster werden dann in einer Beanspruchungszeitreihe ähnlich große Extremwerte bezeichnet, welche mit geringen Zeitlücken aufeinander folgen. Wird zufällig ein geeigneter Ausschnitt eines langen Messschriebs betrachtet, können einzelne Cluster bereits am Signalverlauf erkannt werden (vgl. Abb. 4.4).

Da hier nur zwei Merkmale zugrunde gelegt werden, reicht das einfache graphentheoretische Verfahren aus, um alle Cluster in einem Diagramm darzustellen. Die Merkmale Extremwertbetrag y_1 und die Zeitlücke x bis zum nächsten Extremwert ähnlicher Größe y_2 (mit $y_2 = y_1 \pm \Delta y$) ergeben in einem x - y -Koordinatensystem Punktwolken, welche die Cluster repräsentieren.

Um einen bezüglich der Ermüdungsuntersuchung richtigen Ansatz zu finden, bedarf das Merkmal Zeitlücke ebenfalls einer Modifikation. Zeitliche Elemente wie z.B. Belastungspausen oder Belastungsgeschwindigkeiten haben nämlich zumindest im HCF-Bereich keinen signifikanten Einfluss auf die Ermüdung. Der Abstand zwischen den Peaks soll daher nicht zeitlich, sondern in Anzahl der zwischenliegenden Extremwerte beschrieben werden. So werden beispielsweise zwei Lkw-Kolonnen, welche eine Brücke direkt nacheinander,

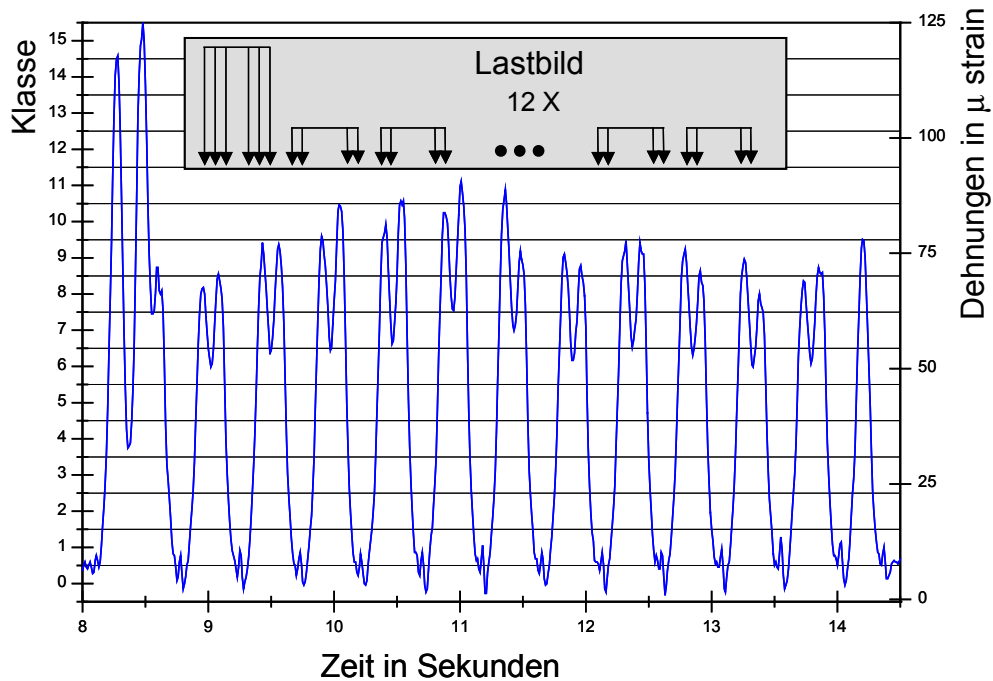
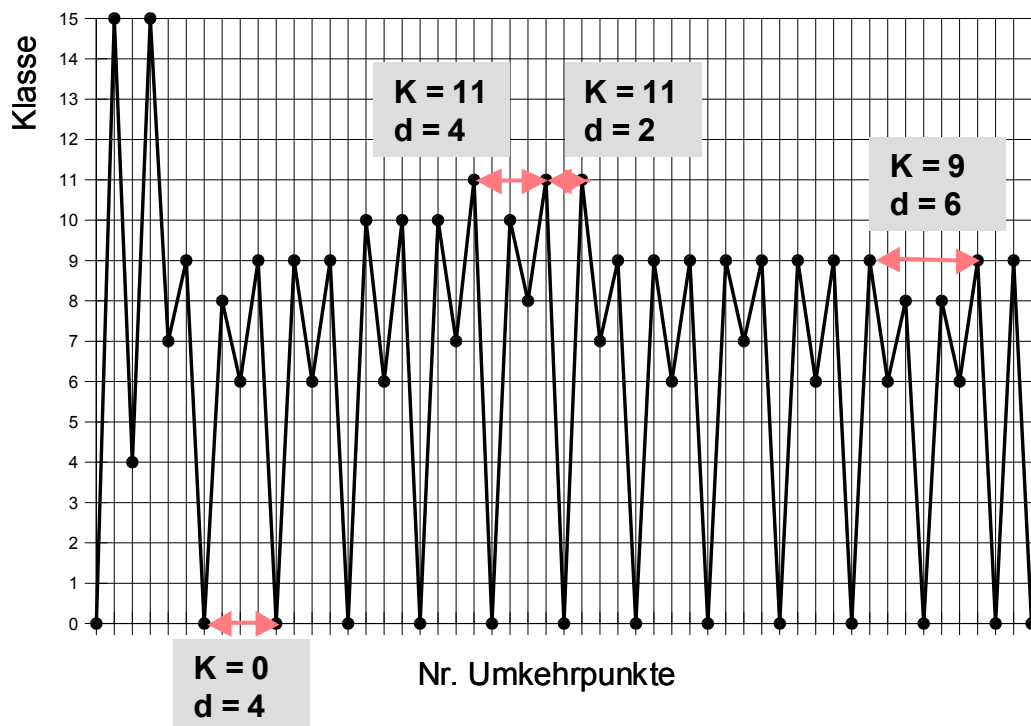


Abb. 4.13 Klassierung des Messschriebs einer Zugüberfahrt. Oben: Lastbild eines Personenzugs mit Lok und 12 Wagen idealisiert nach DS 804

aber mit einem großen zeitlichen Abstand passieren (z.B. nachts), als ein langer Pulk registriert.

Die nachfolgenden Beispiele sollen die Vorgehensweise zur Darstellung der Cluster verdeutlichen. Zunächst wird die Beanspruchungszeitreihe einer Zugüberfahrt analysiert. Durch eine Klassierung fallen bereits ähnlich große Extremwerte in dieselbe Klasse, so dass anstatt der Betrachtung von ähnlich großen aufeinander folgenden Extremwerten die Betrachtung von Umkehrpunkten gleicher Klasse genügt (Abb. 4.13). Somit sind beide Merkmale Klassennummer und Abstand zum nächsten Umkehrpunkt gleicher Klassennummer diskrete Größen. Bei der Verwendung des graphentheoretischen Verfahrens wird es keine Punktwolken geben. Die Objekte gleicher Eigenschaft werden daher durch eine Matrix- bzw. Histogrammdarstellung sichtbar gemacht. Dabei werden die Zeilen zur Kennzeichnung der Klassennummer eines Umkehrpunkts und die Spalten zur Kennzeichnung des Abstandes zwischen zwei aufeinander folgenden Umkehrpunkten gleicher Klasse verwendet. Abb. 4.14 veranschaulicht die Zählweise. Das Resultat der Auszählung für die in Abb. 4.14 dargestellte Umkehrpunktfolge zeigen Abb. 4.15 und 4.16. Die Häufigkeitsverteilung dieser Matrix ist für die untersuchte Umkehrpunktfolge charakteristisch. Die Matrixdarstellung hat außerdem den Vorteil, dass eine Quantifizierung der Cluster stattfindet.

Der Zeitschrieb wurde während einer Zugüberfahrt am Untergurt eines Querträgers aufgezeichnet. Typisch für die Umkehrpunktfolge dieser Messstelle ist u.a. die Wiederkehr der Klasse "0" nach vier Umkehrpunkten. Dieser Effekt ist in Abbildung Abb. 4.13 anhand des

Abb. 4.14 Definition der Klassen (K) und der Abstände (d) in einer Clustermatrix

Lastbilds leicht nachvollziehbar. Die Matrix in Abb. 4.15 spiegelt die typische Wiederkehr der Klasse "0" nach vier Umkehrpunkten in Element (0;4) sehr gut wieder. Die Doppelspitzen, welche durch die rasche Aufeinanderfolge der Achsen zweier Wagen erzeugt werden, sind im Element (9;2) und den Nachbarklassen, den Elementen (8;2), (10;2) und (11;2), wiederzufinden.

		ABSTAND								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
KLASSE	0	1		11		1				
	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6			4				1		
	7							2		
	8	1								
	9	10		1		1				
	10	2		1						
	11	1		1						
	12									
	13									
	14									
	15	1								

Abb. 4.15 Ergebnis der Auszählung gemäß Abb. 4.14

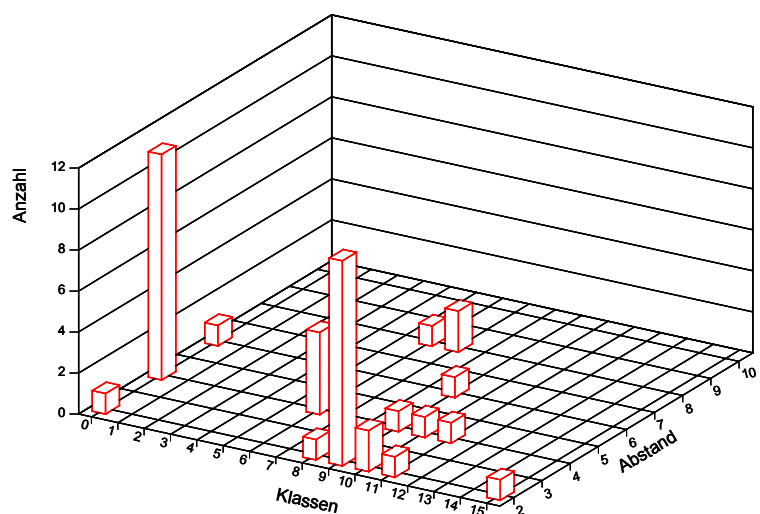


Abb. 4.16 Häufigkeitsverteilung der Matrix nach Abb. 4.15

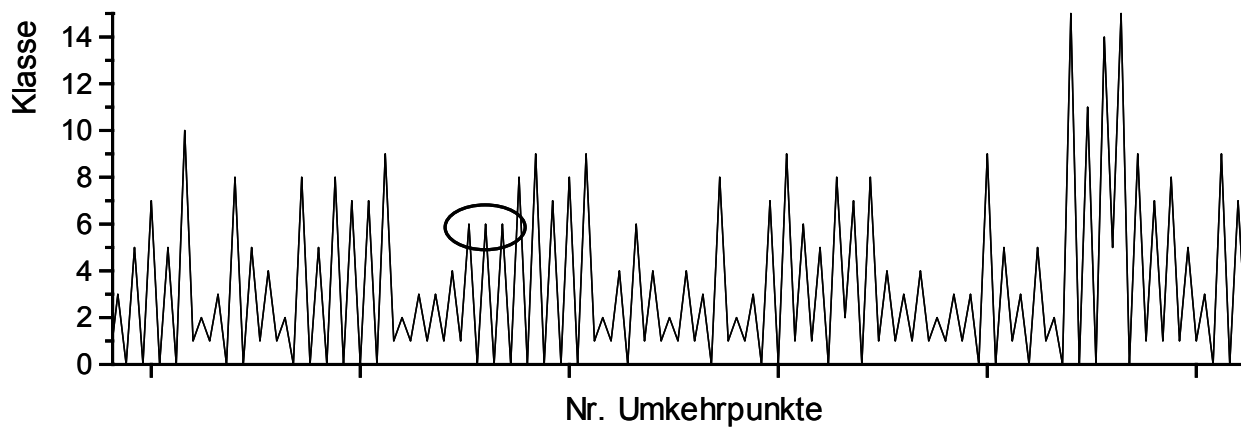


Abb. 4.17 Ausschnitt einer Umkehrpunktfolge eines am Querträgeruntergurt der Autobahnbrücke aufgezeichneten Messschriebs

Beim zweiten Beispiel handelt sich um einen Tagesschrieb der Autobahnbrücke BS-Wenden. Die untersuchte Messstelle befand sich am Untergurt eines Querträgers (vgl. Abb. 4.3). Durch das Systemtragverhalten und die relativ hohe Dämpfung infolge der Fahrbahnbetonplatte erscheinen die meisten Fahrzeuge bzw. Achslasten nur als einzelner Peak im Messschrieb und das Signal kehrt ohne nennenswertes Nachschwingen wieder auf das Ausgangsniveau zurück. Abb. 4.17 zeigt einen Ausschnitt der entsprechenden Umkehrpunktfolge. Das Auszählungsergebnis ist in Abb. 4.18 als Häufigkeitsverteilung dargestellt. Dort sind Paarungen mit geraden Abstandszahlen signifikant, was typisch für das erwähnte Systemverhalten ist.

Theoretisch können beliebig lange Abstände berücksichtigt werden. Im Sinne einer Clusteruntersuchung sind jedoch nur die geringen Abstände von Interesse.

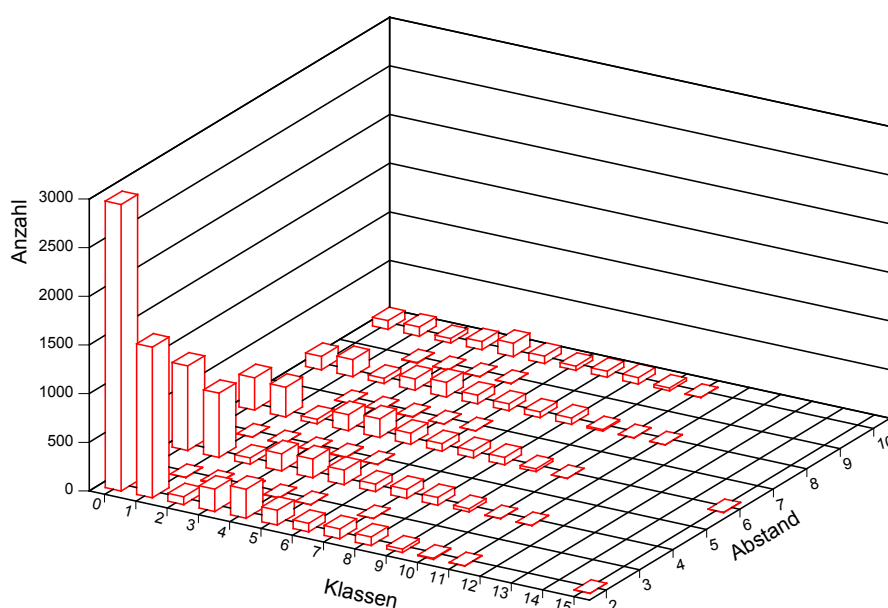


Abb. 4.18 Ergebnis der Auszählung zusammenhängender Umkehrpunkte gleicher Klasse (Tagesschrieb des Querträgers einer Straßenbrücke)

Die Verteilungen in Abb. 4.16 und 4.18 sind nur die Vorstufe zu der Darstellung der Cluster. Die Elemente der Matrix stellen die absoluten Häufigkeiten von Ketten dar, die aus immer zwei Umkehrpunkten gleicher Größe bestehen. Aus dem Element geht aber nicht hervor, ob die Paarungen vereinzelt oder clusterweise auftreten. Daher wird im nächsten Schritt der Zählalgorithmus derart verfeinert, dass die Anzahl der zusammenhängenden Umkehrpunkte als "Clusterumfang" registriert wird. Beispielsweise handelt es sich bei den in Abb. 4.17 mit einer Ellipse gekennzeichneten Umkehrpunkten um einen Cluster mit den Parametern "Klassennummer: 6", "Abstand: 2" und "Umfang: 3".

Durch das zusätzliche Merkmal erhöht sich nun die Dimension des Datensatzes von drei auf vier:

1. Klassennummer,
2. Abstand der Umkehrpunkte,
3. Clusterumfang (Länge einer Kette) und
4. Anzahl der Ketten bzw. Cluster gleicher Eigenschaft.

Wegen der vierten Dimension wird nun die Darstellung problematisch. Hierzu gibt es verschiedene Lösungswege. Es ist denkbar, im Sinne der klassischen Clusteranalyse das graphentheoretische Verfahren aufzugeben, und die Cluster mit Hilfe von Proximitätsmaßen aufzudecken. Durch die Umrechnung der Merkmale zweier Objekte zu Proximitätsmaßen tritt jedoch eine Verzerrung ein. Bei der Bestimmung von Proximitätsmaßen wird über eine mathematische Beziehung aus allen Merkmalen des einen Objekts zusammen mit allen Merkmalen des zweiten Objekts eine einzige Größe bestimmt, welche den Grad der Verwandtschaft der Objekte zum Ausdruck bringt. Das Ergebnis verliert den Vorteil, direkt interpretierbar zu sein und Objektmerkmale wiedererkennen zu lassen. Es lässt sich nicht mehr zur Generierung von synthetischen Beanspruchungszeitreihen unmittelbar verwenden.

Eine sinnvolle Möglichkeit besteht darin, dass die Merkmale 1 und 2 wie zuvor den Zeilen und Spalten einer Matrix zugeordnet werden. Die Elemente der Matrix bestehen nun jeweils aus Diagrammen, welche die Merkmale 3 und 4 darstellen. Das Ergebnis der Auszählung für den erwähnten Tagesschrieb unter Berücksichtigung des Clusterumfangs ist in Abb. 4.19 dargestellt. Wegen der besseren Lesbarkeit ist hier nur ein vergrößerter Ausschnitt mit den maßgebenden Elementen abgebildet. Die Anzahl der Cluster nimmt mit zunehmender Länge bzw. Clusterumfang rapide ab, so dass für die Darstellung eine logarithmische Teilung der Ordinate sinnvoll ist.

Da weniger als 4 Merkmale untersucht werden, ließe sich diese Matrix auch als ein Quadrat darstellen. Dabei repräsentieren die Kanten der Grundfläche jeweils die Klasse und

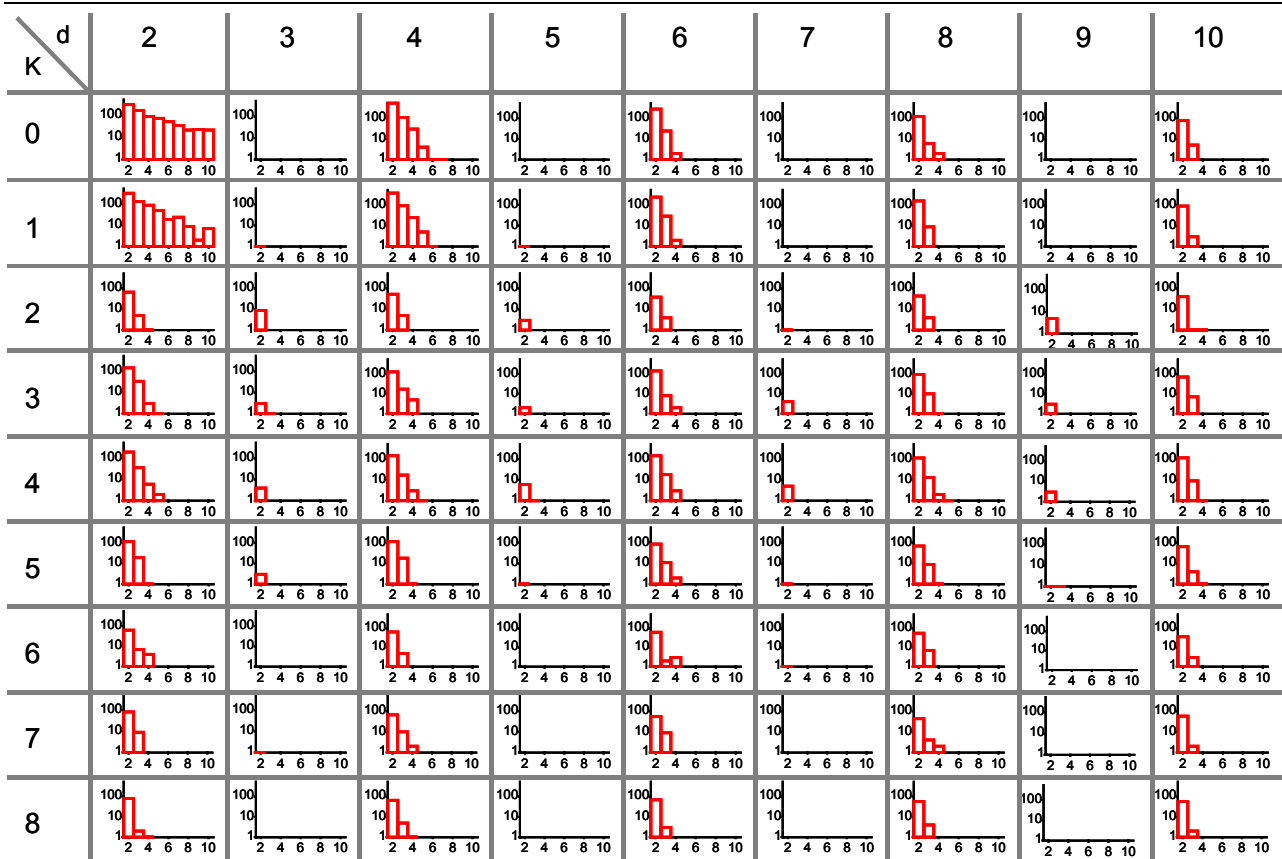


Abb. 4.19 Ausschnitt der vierdimensionalen Clustermatrix. Die Ordinaten der Diagramme geben die Anzahl und die Abszissen den Umfang der Cluster an. Für "K" und "d" vgl. Abb.4.14.

den Abstand sowie die Höhe in "Ebenen" den Clusterumfang (analog zu der Darstellung der mehrstufigen Übergangsmatrix im nächsten Abs. (vgl. Abb. 4.20)). Die Rohdaten der Matrix der Abb. 4.19 sind in Anlage 4.10 als einzelne Matrixebenen angegeben. Da der Datensatz sehr umfangreich ist, sind lediglich als Beispiel die ersten drei Ebenen, d.h. bis Clusterumfang = 4, abgebildet.

Der Einsatz der Clustermatrix bei der Generierung von synthetischen Beanspruchungszeitreihen sowie die Betrachtung der Clustermatrix in einzelnen Ebenen eines Quaders wird später in Abs. 4.4.1.3 und Abs. 4.6 gezeigt.

4.3.3.2 Mehrstufige Übergangsmatrizen

Unabhängig von Clustern ist eine detaillierte Untersuchung der Übergänge zur Identifizierung von typischen Reihenfolgen von Interesse. Bei der gewöhnlichen Übergangsmatrix (oder auch Von-Nach-Matrix) werden die Übergänge von einer Klasse in die direkt darauf folgende Klasse erfasst, also von Umkehrpunkt zum Umkehrpunkt. Durch eine mehrstufige Übergangsmatrix werden zusätzlich Sprünge, die mehr als einen Umkehrpunkt entfernt sind, jeweils in gesonderten Übergangsmatrizen registriert und gemäß Abb. 4.20 in verschiedenen Ebenen dargestellt. Die erste Ebene der Matrix entspricht dabei der gewöhnlichen Übergangsmatrix. Da entsprechend dieser Vorgehensweise weitere Informationen

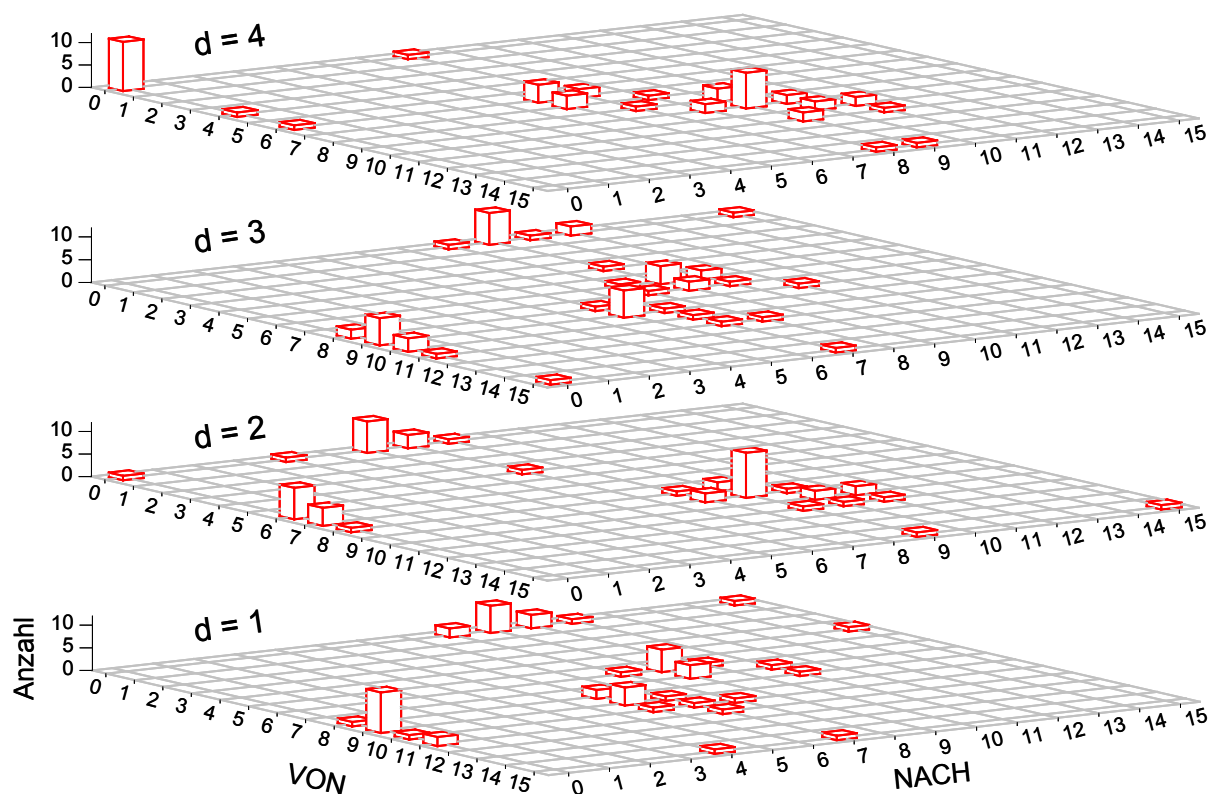


Abb. 4.20 Mehrstufige Übergangsmatrix zu der Umkehrpunktfolge der Abb. 4.14 (Rohdaten s. Abb. 4.26)

über die Beanspruchungszeitreihe in den höheren Ebenen der Matrix registriert werden, können Reihenfolgecharakteristika besser erfasst werden. Der in Abb. 4.20 dargestellten Matrix liegt die Umkehrpunktfolge der Zugüberfahrt nach Abb. 4.14 zugrunde. Die oben bereits angesprochene typische Wiederholung der Klasse "0" nach vier Umkehrpunkten wird in der vierten (oberste) Ebene der Matrix durch das Element (0;0) aufgezeigt.

4.3.3.3 Verteilung der Fahrzeuggesamtwichte

Bisher wurden immer die Beanspruchungen eines Details anhand von Umkehrpunkten analysiert. Neben diesen Beanspruchungen sind die auf das Bauwerk einwirkenden Lasten von großem Interesse. Die Kenntnis der Lasten und deren Eigenschaften, wie z.B. die Verteilung ihrer Beträge oder ihre typischen Reihenfolgen, hat den Vorteil, dass diese Informationen für das gesamte Bauwerk gelten und dass dadurch ein Rückschluss auf die Beanspruchung beliebiger Details des Tragwerks möglich ist. Informationen dieser Art sind sogar bauwerksübergreifend zur Schätzung ähnlicher Fälle im gleichen Streckenabschnitt in der Umgebung des untersuchten Bauwerks verwertbar.

Sind bestehende Bauwerke zu untersuchen, fehlen in der Regel Messdaten aus der Vergangenheit. Die Kenntnis über die Verteilung der Lasten (Fahrzeuggesamtwichte) ge-

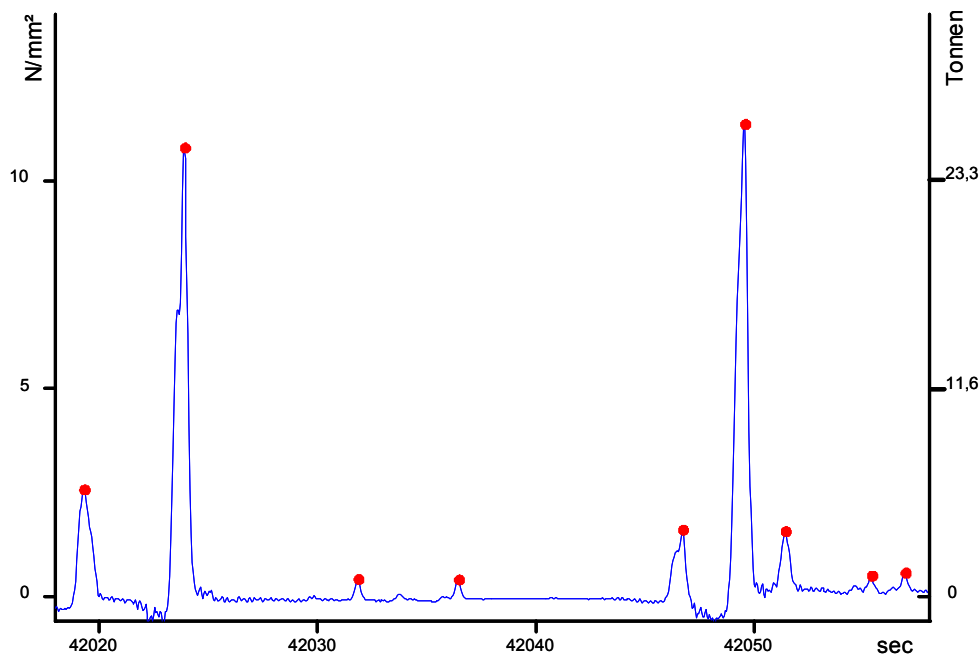


Abb. 4.21 Diskrete Zeitreihe der Fahrzeuggewichte, dargestellt als Punkte an den Peaks der Beanspruchungs-Zeit-Funktion.

hört zu den wichtigsten Informationen, die benötigt werden, um Beanspruchungszeitreihen der Vergangenheit zu rekonstruieren.

Zur Bestimmung von Fahrzeuggesamtgewichten wurde die Beanspruchungs-Zeit-Funktion einer Messstelle am Querträger der untersuchten Autobahnbrücke betrachtet. Mit Hilfe eines statischen Stabwerkmodells wurden aus den gemessenen Dehnungsspitzenwerten die Gewichte näherungsweise bestimmt. Für die Vorführung der Auswertemethoden ist hier eine Ermittlung der Gewichte ohne Berücksichtigung dynamischer Effekte ausreichend genau. Als Ergebnis entsteht eine Gewicht-Zeit-Ereignisfolge (Abb. 4.21, diskrete Punkte).

Im nächsten Schritt wird das Merkmal *Gewicht* aus der gewonnenen Ereignisfolge gezählt und klassiert (vgl. Histogramm Abb. 4.22). Die Verteilung der Fahrzeuggewichte lässt sich durch die Kombination von vier Normalverteilungen gut schätzen. Jede Dichteverteilung repräsentiert einen Fahrzeugtyp im Straßenverkehr. Die Verteilungsfunktion und die kumulative Häufigkeitsfunktion bieten zusätzlich eine gute grafische Vergleichsmöglichkeit und erlauben mittels Integration eine Kontrolle der ermittelten Parameter der Normalverteilungen. Es ist einleuchtend, dass die Normalverteilungen nur innerhalb von physikalisch sinnvollen Schranken gelten. Anhand der Mittelwerte der Verteilungen werden folgende Fahrzeugtypen identifiziert:

- | | |
|-------------------------|--------------------------------|
| 1) Motorräder und Pkw's | 2) Transporter und leere Lkw's |
| 3) Leichte Lkw's | 4) Schwere Lkw's |

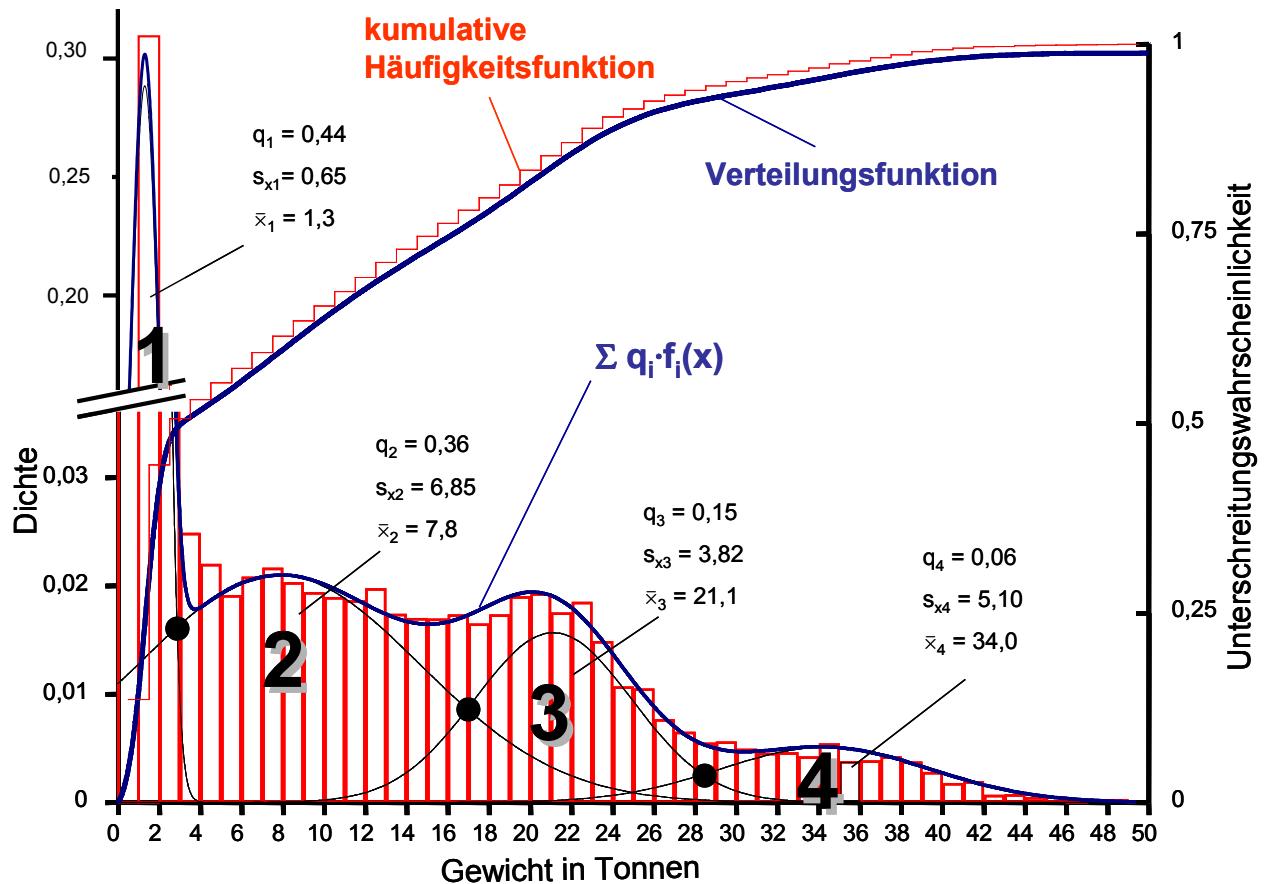


Abb. 4.22 Verteilung der Fahrzeuggewichte, die durch die Kombination von 4 Normalverteilungen angenähert wird.

4.3.3.4 Zeitreihen von identifizierten Fahrzeugen

Sind die Lastverteilungen durch Auswertung von Messdaten oder aus geschätzten bzw. bekannten Fahrzeuganteilen einer Strecke bekannt, interessiert noch die Frage nach der Charakteristik der Aufeinanderfolge von Fahrzeugen. Diese Charakteristik ist von vielen Faktoren abhängig und ist in der Regel in Bezug auf die zu untersuchende Brücke spezifisch.

Detaillierte Untersuchungen des Verkehrsgeschehens von BOGATH an der Brenner Autobahn zeigen, dass die Einzelteile des Gesamtsystems Straßenzug - Fahrzeuge - Verkehrsgeschehen nicht unabhängig voneinander betrachtet werden können, sondern vielmehr über Wirkungen und Wechselwirkungen stochastischer Natur miteinander verbunden sind [BOGA 99]. Topographische und infrastrukturelle Faktoren, wie z.B. Gefälle, Streckenkurvigkeit, Anzahl der Fahrspuren, innerstädtische Verbindung oder Transitstrecke im Grenzgebiet, menschliches Fahrverhalten etc., können die Verkehrscharakteristik signifikant beeinflussen.

Um diese Charakteristik zu untersuchen wird eine Zeitreihe benötigt, welche den Ver-

kehrsablauf durch die Aufeinanderfolge von Fahrzeugtypen wiedergibt. Die Gewicht-Zeit-Ereignisfolge (Abb. 4.21) muss derart modifiziert werden, dass die Gewichte durch die vier identifizierten Fahrzeugtypen ersetzt werden können. Dafür muss die Gewicht-Zeit-Ereignisfolge erneut ausgewertet werden, um bei jedem Gewicht zu entscheiden, welcher Fahrzeugtyp vorliegt. Die Dichtefunktionen nach Abb. 4.22, welche die Erwartungswerte und Standardabweichungen der Gewichte jedes Fahrzeugtyps beschreiben, dienen dabei als Orientierungshilfe. In bestimmten Fällen machen jedoch die Überlappungsbereiche der Dichtefunktionen diese Entscheidung schwer. Beispielsweise kann ein Gewicht von 28 Tonnen entweder einem Fahrzeug des Typs 4 oder des Typs 3 oder theoretisch sogar einem Fahrzeug des Typs 2 entstammen.

Dieses Problem wird mit Hilfe der Diskriminanzanalyse gelöst. Die Formulierung der Aufgabenstellung mittels der bereits eingeführten Begriffe lautet: Es liegen vier Gruppen vor, nämlich die Fahrzeugtypen 1 bis 4. Bei der Auswertung wird bei jedem Objekt (Peak) anhand des Klassifikationsmerkmals Gewicht die Gruppenvariable G_i bestimmt. Der anhand des Gewichtes erkannte Fahrzeugtyp wird dann zusammen mit seinem Auftretenszeitpunkt zur Bildung der gesuchten Zeitreihe verwendet.

Durch eine Zuordnungsregel werden Trennpunkte auf der Gewichtsachse bestimmt, welche die Bereiche der vier Gruppen gegeneinander abgrenzen. Die optimale Zuordnungsregel in dem vorliegenden Fall lautet: Ein Objekt wird der Gruppe zugeordnet, in der die *tatsächliche Dichte* für dessen Merkmal am größten ist. Für zwei benachbarte Gruppen G_1 und G_2 heißt dies beispielsweise

$$D^* = \begin{cases} G_1 & \text{falls } q_1 \cdot f_1(x) > q_2 \cdot f_2(x) \\ G_2 & \text{falls } q_2 \cdot f_2(x) \geq q_1 \cdot f_1(x) \end{cases}, \quad (4.2)$$

wobei D^* die optimale Zuordnungsregel, G_i eine Gruppenvariable, q_i eine a priori Wahrscheinlichkeit und f_i die *bedingte Dichte* des Fahrzeugtyps mit ($i = 1 \dots 4$) sind.

Von der bedingten Dichte wird gesprochen, wenn Verteilungen innerhalb der Gruppen betrachtet werden. Dies wäre z.B. der Fall, wenn wir für das Gewicht der Fahrzeuge des Typs 1 Angaben verschiedener Hersteller und Zulassungszahlen ausgewertet hätten. Zum Verwenden einer bedingten Dichte innerhalb der Gesamtheit aller möglichen Fahrzeuge muss noch der Anteil dieses Fahrzeugtyps am Gesamtverkehr bekannt sein, mit dem man die tatsächliche Dichte ermitteln kann. Eine Annäherung des Histogramms in Abb. 4.22 durch eine Kombination von bedingten Dichten ist nicht möglich. Erst durch die "Kalibrierung" mit Hilfe ihrer Anteile q_i (a priori Wahrscheinlichkeiten) ist eine Annäherung des Histogramms und ein Integral über den gesamten Bereich mit dem Wert 1,0 möglich. Bei

der Anpassung des Histogramms nach Abb. 4.22 wurden neben Mittelwert und Standardabweichung gleichzeitig die a priori Wahrscheinlichkeiten der Dichtefunktionen in der Ansatzfunktion berücksichtigt.

Die oben genannte Zuordnungsregel ist anschaulich in Abb. 4.22 durch schwarze Punkte dargestellt: Die Schnittpunkte der Dichtefunktionen geben jeweils auf der Abszisse den Trennpunkt an, der zwei benachbarte Gewichtsbereiche gegeneinander abgrenzt. Danach werden die Peaks in Abb. 4.21 wie folgt klassifiziert:

$$D^* = \begin{cases} G_1 & \text{falls } 0 < \text{Gewicht} \leq 3,0t \\ G_2 & \text{falls } 3,0t < \text{Gewicht} \leq 17,0t \\ G_3 & \text{falls } 17,0t < \text{Gewicht} \leq 28,5t \\ G_4 & \text{falls } 28,5t < \text{Gewicht} \end{cases} \quad (4.3)$$

Abb. 4.23 zeigt einen Ausschnitt des Ergebnisses der Auswertung. Die gesuchte Zeitreihe von Fahrzeugtypen ist durch die nummerierten Halbkreise unter dem Signal dargestellt.

Schließlich ist noch die Fehlerrate der gewählten Zuordnungsregel anzugeben. Die Fehler-rate ist wichtig, da das Ziel der Diskriminanzanalyse die Bildung einer Zeitreihe aus Fahr-

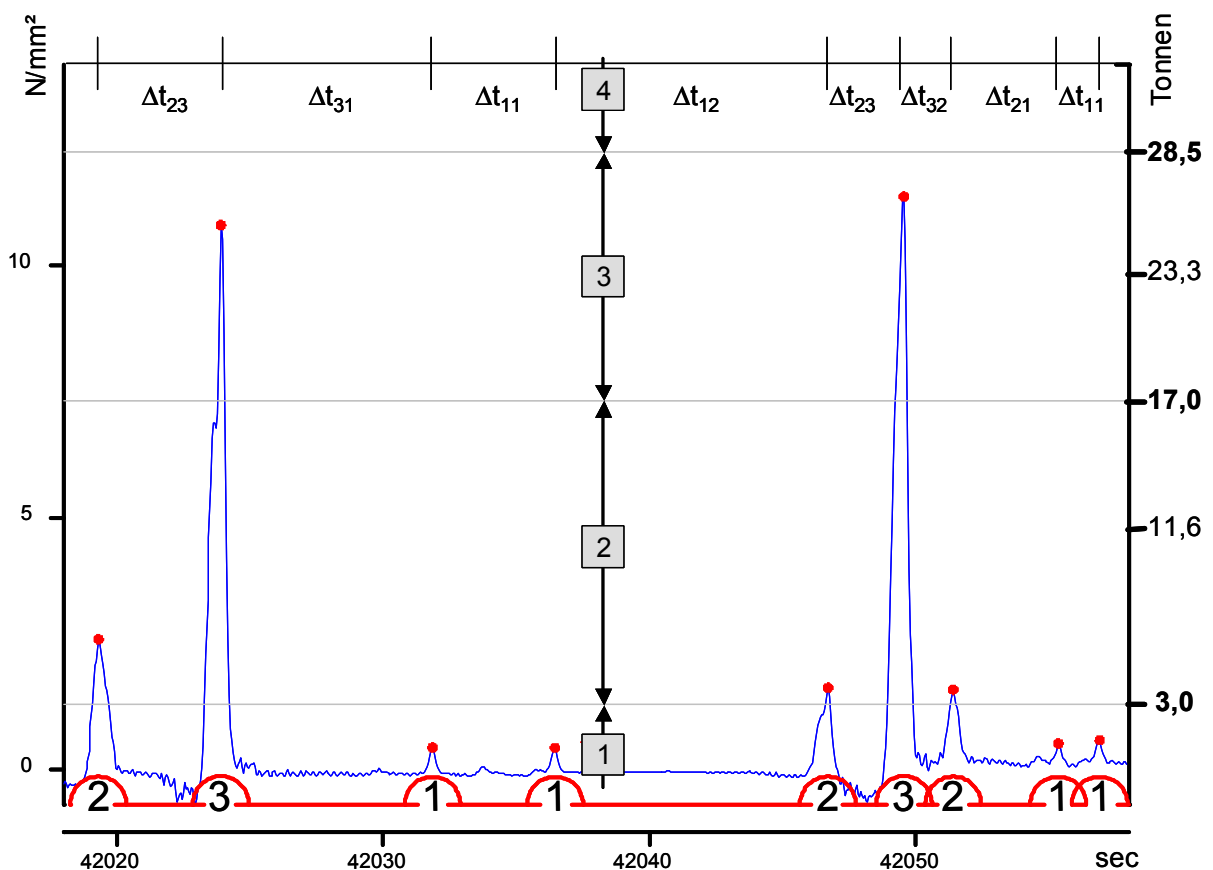


Abb. 4.23 Zuordnung von Fahrzeugtypennummern aufgrund des Gewichts; Die Kurve mit Halbkreisen unten im Bild entspricht der Zeitreihe der Fahrzeugtypen 1 bis 4

zeugen zur Untersuchung ihrer Reihenfolgecharakteristika und ihrer typischen Zeitlücken ist. Ein Zuordnungsfehler bei der Fahrzeugidentifizierung fließt natürlich in das Untersuchungsergebnis ein. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Gewicht falsch zugeordnet wird, ist theoretisch immer gegeben, und zwar um so mehr, je größer die Überlappungsflächen der Verteilungen sind. Liegt z.B. das Gewicht eines Fahrzeugs von Typ 1 zufällig im Bereich der Ausläufer seiner zugeordneten Verteilung, wird es aufgrund der gewählten Zuordnungsregel fälschlicherweise der Nachbargruppe zugeordnet werden, weil dort die Dichtefunktion der Nachbargruppe dominiert.

Der Anteil falsch klassifizierter Fälle jeder Gruppe liegt also in den Auslaufbereichen der Verteilungen. Die Grenze ist dabei jeweils der Schnittpunkt benachbarter Verteilungen. Der Anteil falsch klassifizierter Fälle der Gruppe 1 "Motorräder und Pkw's" ist in dem gezeigten Beispiel (vgl. Abb. 4.22)

$$P_1(D^* \neq G_1) = q_1 \cdot \int_3^{\infty} f_1(x) dx = 0,002. \quad (4.4)$$

Entsprechend ergibt sich der Anteil falsch klassifizierter Fälle der Gruppe 2 "Transporter und leere Lkw's"

$$P_{2,links}(D^* \neq G_2) + P_{2,rechts}(D^* \neq G_2) = q_2 \cdot \int_0^3 f_2(x) dx + q_2 \cdot \int_{17}^{\infty} f_2(x) dx = 0,041 + 0,032 \quad (4.5)$$

die Falschzuordnungen der Gruppe 3 "leichte Lkw's"

$$P_{3,links}(D^* \neq G_3) + P_{3,rechts}(D^* \neq G_3) = q_3 \cdot \int_0^{17} f_3(x) dx + q_3 \cdot \int_{28,5}^{\infty} f_3(x) dx = 0,021 + 0,004 \quad (4.6)$$

und für die Fälle der Gruppe 4 "schwere Lkw's"

$$P_4(D^* \neq G_4) = q_4 \cdot \int_0^{28,5} f_4(x) dx = 0,008 \quad (4.7)$$

Der Anteil insgesamt falsch zugeordneter Fälle wird als Fehler der Zuordnungsregel $F(D^*)$ bezeichnet. Er ergibt sich aus der Summe aller Anteile zu

$$F(D^*) = \sum_{i=1}^4 P_i = 0,108 \quad (4.8)$$

Das Beispiel zeigt, dass insgesamt rund 11% der Fälle falsch klassifiziert werden können.

Der relativ hoher Anteil falsch klassifizierter Fälle wird hier offensichtlich durch die auffällig große Standardabweichung der Verteilung Nr. 2 aus Abb. 4.22 verursacht.

Ein Vergleich mit [SEDL 84] oder [BOGA 99] bzgl. der Dichteverteilungen von gemessenen Fahrzeuggesamtgewichten auf verschiedenen Teilstrecken zeigt ebenfalls, dass sich der Gesamtverkehr oft nicht wie erwünscht aus ausgeprägten Verteilungsformen mit geringen Standardverteilungen zusammensetzen lässt. Das bedeutet, dass für eine fehlerarme Zuordnung der Fahrzeuge das gewählte Merkmal Gewicht allein nicht immer ausreicht, wenn die Verteilungsformen ungünstig sind. Eine hohe Fehlzuzuordnungsrate kann jedoch auch dann eintreten, wenn zu viele mögliche Gruppenvariablen existieren.

Durch das Zusammenfassen ähnlicher Gruppen lässt sich die Anzahl der Gruppenvariablen und damit der Fehler der Zuordnungsregel $F(D^*)$ reduzieren. Könnte man davon ausgehen, dass sich zwei Gruppen im Straßenverkehr ähnlich verhalten (z.B. Typ 2 "Transporter und leere Lkw's" und Typ 3 "leichte Lkw's"), wäre ihr Zusammenfassen zu einer Gruppe mit einer bimodalen Verteilung denkbar. Dadurch würde sich der Anteil falsch klassifizierter Fälle in diesem Beispiel auf etwa 5,5 % reduzieren. Dies wäre gleichwertig mit dem Akzeptieren des oben ermittelten Fehlers von 11 % ausgehend von der Überlegung, dass rund die Hälfte des Fehlers als nicht sehr tragisch anzusehen ist, da es sich hierbei nur um Fehlzuzuordnungen zwischen den sich ähnelnden, prägnanter sich im Straßenverkehr ähnlich verhaltenden Gruppen 2 und 3 handelt.

Ist eine Reduktion der Gruppenvariablen durch Zusammenfassen nicht vertretbar, kann der Anteil falsch klassifizierter Fälle auch durch die Berücksichtigung weiterer Merkmale reduziert werden. In diesem Beispiel ist der Merkmalsvektor eindimensional. Würde man beispielsweise noch die Geschwindigkeit der Fahrzeuge mit Hilfe einer zweiten Messstelle aus dem Signalzeitunterschied bestimmen, könnte man zur Klassifizierung einen zweidimensionalen Merkmalsvektor bestehend aus den Komponenten Gewicht und Geschwindigkeit einsetzen. Die Frage, inwiefern die Berücksichtigung des Merkmals Geschwindigkeit ein Vorteil ist, ließe sich dabei vorab durch eine Clusteranalyse klären. Es müssten sich Cluster von Objekten mit ähnlichen Gewichten und ähnlichen Geschwindigkeiten zeigen. Weitere zur Identifizierung von Fahrzeugen sinnvolle Merkmale können z.B. der Achsabstand, der Signalverlauf, das Signal des gleichen Fahrzeugs an einer anderen Messstelle oder das Frequenzband des Motorgeräuschs sein. Soweit Kosten und Aufwand im Rahmen bleiben, ist eine Auswertung von parallel zur Messung durchgeführten Videoaufzeichnungen des Verkehrs eine Alternative zu der beschriebenen Vorgehensweise.

Es ist noch anzumerken, dass bei der in diesem Abschnitt beschriebenen Vorgehensweise sowohl die Dichteverteilungen als auch die a priori Wahrscheinlichkeiten über relative Häufigkeiten (Schätzung durch ein Histogramm) bestimmt wurden. Dabei wurde davon

ausgegangen, dass die vorliegende Stichprobe als repräsentativ für die Grundgesamtheit angesehen werden kann. Die Anteile innerhalb der Stichprobe wurden als gute Schätzwerte für die a priori Wahrscheinlichkeiten verwendet. Auch der Umfang der Stichprobe wurde als groß genug zur Schätzung von bedingten Dichten einzelner Gruppen angesehen. Diese Annahmen sind in der Regel gerechtfertigt, wenn Daten aus Dauermessungen über lange Zeiträume für die Auswertung zugrundegelegt werden.

4.3.3.5 Verteilung der Zeitlücken zwischen Fahrzeugen

Wird zur Generierung synthetischer Beanspruchungszeitreihen ein dynamisches Modell des Tragwerks verwendet (siehe Abs. 4.4.2), müssen die Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen realistisch berücksichtigt werden, da sie die simulierte Bauwerksantwort beeinflussen.

Hierfür wird auf der Grundlage der Zeitreihe von identifizierten Fahrzeugtypen der zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen registriert und ausgezählt (vgl. Abb. 4.23 oben). Die Häufigkeitsverteilungen dieser Abstände können in einer Matrix dargestellt werden. Bei den vorliegenden 4 verschiedenen Fahrzeugtypen ergibt die Anzahl der Variationen V von je 2 Elementen (2 aufeinanderfolgende Fahrzeuge) mit Wiederholung der Elemente: $V_{m.w.}(4;2) = 2^4 = 16$.

Zur Darstellung der Verteilungen wird in diesem Fall eine 4 x 4-Matrix verwendet, wobei die Zeilennummer die Nummer des ersten und die Spaltennummer die Nummer des dar-

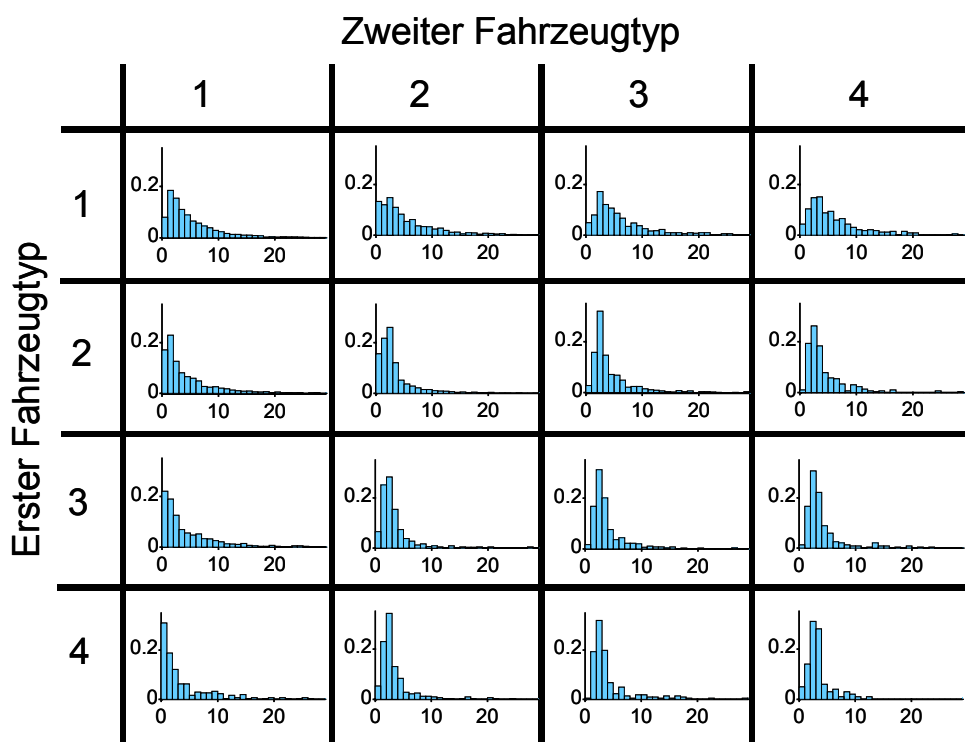


Abb. 4.24 Dichteverteilungen der Zeitlücken zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen. Abszissenwerte in Sekunden.

auffolgenden Fahrzeugtyps angibt. In jedem Element beschreibt eine Dichteverteilung die typischen zeitlichen Abstände zwischen den betrachteten Fahrzeugtypen (Abb. 4.24).

Ein Beispiel zur Veranschaulichung: Bei dem Matrixelement (3;1) handelt es sich um die Verteilung der Zeitspanne, die verstreicht, bis nach einem Fahrzeug des Typs 3 ein Fahrzeug des Typs 1 auftaucht. Die auffällig niedrigen Modalwerte der Verteilungen in den Elementen (3;1) und (4;1) zeigen, dass oft Pkw's dicht hinter Lkw's auf eine Überholgelegenheit warten. Eine andere Auffälligkeit sind die relativ hohen Dichten unter den großen Fahrzeugen bei verhältnismäßig geringen Modalwerten, was als ein Indiz für das geclusterte Auftreten von Lkw's anzusehen ist.

4.3.3.6 Typische Reihenfolgen von Fahrzeugen

Zur Untersuchung von typischen Reihenfolgen werden bei der Auswertung hier jeweils drei aufeinander folgende Fahrzeugtypen berücksichtigt. Es wird untersucht, welcher Fahrzeugtyp sich an die Folge der ersten beiden Fahrzeugtypen anschließt. Auch hier lässt sich das Ergebnis in einer mit Diagrammen besetzten 4 x 4-Matrix darstellen, da die Anzahl der Variationen identisch ist (Abb. 4.25). Die Zeilennummer der Matrix gibt den ersten Fahrzeugtyp an, die Spaltennummer den zweiten. Die dargestellten Diagramme sind Häufigkeitsverteilungen, bei denen die Abszisse die Typennummer des dritten Fahrzeugs angibt. Die Diagramme drücken also die Wahrscheinlichkeiten für die Fahrzeuge aus, die auf eine bestimmte Kombination von Zeilen- und Spaltennummer folgen.

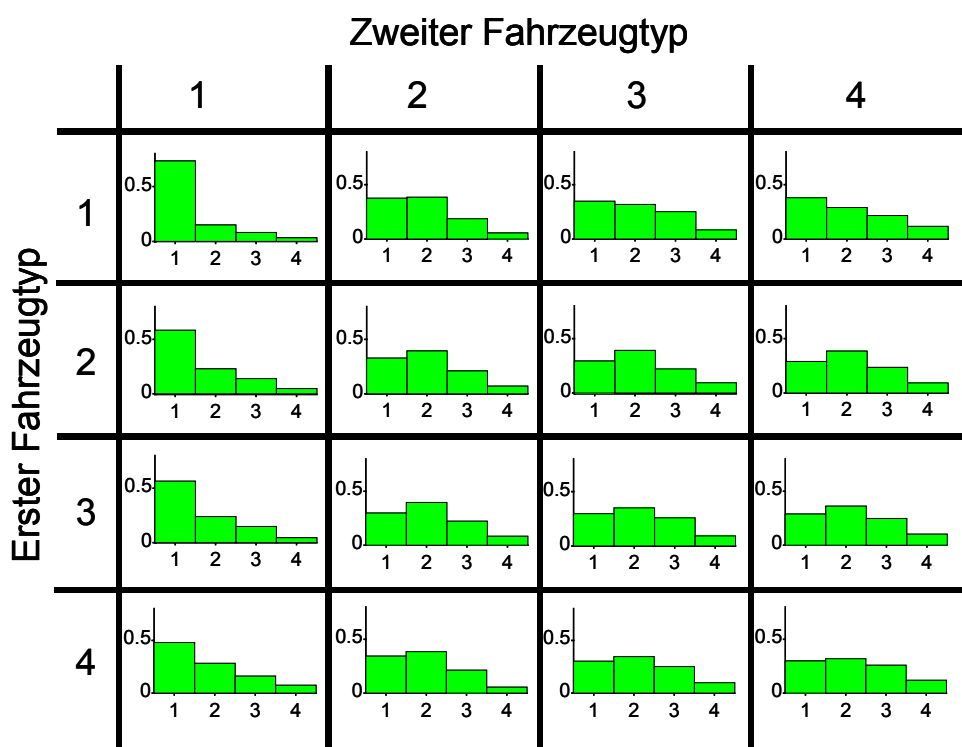


Abb. 4.25 Verteilungen der Reihenfolgen. Der Abszissenwert kennzeichnet das dritte Fahrzeug einer Kette aus drei Fahrzeugen.

4.3.3.7 Reihenfolgen der Umkehrpunkte

Typische Reihenfolgen von Fahrzeugtypen spiegeln sich natürlich auch in den Reihenfolgen der Umkehrpunkte einer Beanspruchungszeitreihe wider. Wird eine synthetische Beanspruchungszeitreihe nicht durch ein dynamisches Modell, sondern unmittelbar aus den gemessenen Umkehrpunkten einer Beanspruchungszeitreihe erzeugt, sind dabei typische Reihenfolgen der Umkehrpunkte von Interesse (siehe Abs. 4.4.1.5 Snake-Algorithmus).

Betrachtet man eine Folge von Umkehrpunkten (Abb. 4.14), lässt sich eine Gemeinsamkeit mit der Zeitreihe für Fahrzeugtypen (Abs. 4.3.3.4) feststellen. Die Menge der Ordinatewerte besteht nämlich aus einer begrenzten Anzahl diskreter Größen: Zum einen die Fahrzeugtypennummer "1" bis "4", zum anderen die Klassennummern "0" bis "15".

Somit lässt sich die Untersuchung der typischen Reihenfolgen der Fahrzeuge nach vorigem Abschnitt analog auf die Umkehrpunkte einer Beanspruchungszeitreihe anwenden. Werden dabei aus drei Umkehrpunkten bestehende Umkehrpunktsequenzen untersucht, kann das Ergebnis entsprechend Abb. 4.25 dargestellt werden. Eine Berücksichtigung längerer Sequenzen ist ebenfalls möglich. Dadurch erhöht sich allerdings die Dimension und eine anschauliche Darstellung ist nicht mehr möglich. In mathematischer Hinsicht spielt die Dimension einer Datenmatrix keine Rolle (vgl. Programm zur Generierung synthetischer Beanspruchungszeitreihen im folgenden Abschnitt).

4.4 Generierung synthetischer Beanspruchungszeitreihen

4.4.1 Vorgehensweise bei neuen Bauwerken

4.4.1.1 Generelle Betrachtung

Bei neuen Bauwerken beinhalten die gemessenen Beanspruchungszeitreihen bereits die Bauwerksantwort und alle weiteren erforderlichen statistischen Informationen für das betrachtete kritische Detail. Nach dem Umwandeln der Beanspruchungszeitreihe in eine Umkehrpunktfolge können synthetische Beanspruchungszeitreihen auf statistischer Grundlage der gemessenen Umkehrpunkte ebenfalls als eine Umkehrpunktfolge generiert werden. Im Labor wird für den Lebensdauertest aus versuchs- und regelungstechnischen Gründen die Beanspruchungs-Zeit-Funktion i.d.R. in Form von Umkehrpunktfolgen eingesetzt. Die Umkehrpunkte werden dann von der Prüfmaschinenregelung durch geeignete Kurven (z.B. Cosinus-Halbwellen) zu einem analogen Signal interpoliert. Das analoge Signal wird zur Sollwertvorgabe verwendet. Daher wird hier der Begriff "Beanspruchungszeitreihe" auch für eine Umkehrpunktfolge verwendet, auch wenn diese eigentlich keine Zeitinformation beinhaltet.

Die synthetische Beanspruchungszeitreihe gilt naturgemäß nur für das kritische Detail, dessen Messschrieb der Generierung zugrunde gelegt wurde. Häufigkeiten und Reihenfolgeeffekte werden durch geeignete Generierungsalgorithmen erfasst. Zum Test und Vergleich der entwickelten Generierungsverfahren wurden die Auswerte- sowie Generierungsalgorithmen programmtechnisch umgesetzt und in einer Anwendung untergebracht. Die wesentlichsten Programmfunktionen, die aus dem Screen shot in Abb. 4.30 zu ersehen sind, werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

4.4.1.2 Generierung auf Grundlage der Übergangsmatrix

Zur Synthese zufallsartiger Lastfolgen mit Hilfe der Übergangsmatrix wird von FISCHER et al. eine Methode vorgeschlagen, die jedoch zur Lösung einer anderen Aufgabenstellung konzipiert wurde [FISC 79]: Es werden zufallsartigen Beanspruchungszeitreihen generiert, welche verallgemeinerungsfähige Versuchsergebnisse liefern. Der Algorithmus führt unter Verwendung einer zweiparametrischen Übergangsmatrix auf pseudo-zufallsartige Belastungsvorgänge, welche jederzeit exakt reproduzierbar sind, so dass durch die Vorgabe von typisierten Übergangsmatrizen typisierte Beanspruchungszeitreihen erzeugt werden können [FISC 77]. Diese werden durch ein eindeutig definiertes Bildungsgesetz für die Folge der Umkehrpunkte immer als identische Last-Zeit-Funktionen erzeugt. Eine so erzeugte Last-Zeit-Funktion wiederholt sich nach jedem vollständigen Ablauf einer Periode und liefert das gleiche Kollektiv wie die Last-Zeit-Funktion, aus der die zugrundegelegte Übergangsmatrix gewonnen wurde.

Hier ist von einem anderen Anforderungsprofil auszugehen. Es müssen neben der Ähnlichkeit der Kollektive noch die statistische Berücksichtigung von Reihenfolgen und Clustern gewährleistet sein. Dabei wird im einfachsten Fall, ähnlich dem Verfahren nach [FISC 79], von folgender Überlegung ausgegangen: In einer Übergangsmatrix bezeichnet der Zeilenindex die Ausgangsklasse und der Spaltenindex die Zielklasse eines jeden Übergangs. Ein Matrixelement H_{ij} gibt die Anzahl der Übergänge von Umkehrpunkten der Klasse i (Zeile i) zu Umkehrpunkten der Klasse j (Spalte j) an. Die Übergänge aus den Elementen entlang einer Matrixzeile beschreiben eine Häufigkeitsverteilung und geben damit Tendenzen an, wie die Übergänge zu den Zielklassen zu erfolgen haben.

Für die Generierung einer Umkehrpunktfolge werden nun "echte" Zufallszahlen in einem Intervall zwischen der untersten und der obersten Klasse nach Maßgabe der Häufigkeitsverteilung einer Matrixzeile, die gerade als Ausgangsklasse dient, gewählt. Hierzu wird die Monte-Carlo-Methode eingesetzt [SOBO 71]. Eine auf diese Weise zufällig bestimmte Zielklasse wird für die Bestimmung des nächsten Umkehrpunkts als Ausgangsklasse definiert, von der ausgehend im nächsten Schritt die neue Zielklasse bestimmt wird.

Bei endlichen Folgen ist naturgemäß keineswegs sichergestellt, dass alle Zielklassen mit den ihnen theoretisch zukommenden Häufigkeiten auch tatsächlich auftreten. Bei dem in [Fisc 79] beschriebenen Verfahren sorgt der Generierungsalgorithmus dafür, dass die Übergangsmatrix der synthetischen Folge nach dem Ablauf einer Periode absolut identisch ist mit der Übergangsmatrix, die der Generierung zugrunde liegt. Dies bedeutet, dass seltene Übergänge am Ende einer Periode immer wahrscheinlicher werden bzw. ihr Eintreten durch das Bildungsgesetz der Pseudozufallszahlen deterministisch bestimmt wird. Dadurch findet ein massiver Eingriff in die natürliche Reihenfolge der Umkehrpunkte statt, vergleichbar mit dem Umstand, man würde nach jedem Wurf beim Roulette das Feld der zuletzt geworfenen Zahl blockieren. Man hätte dann zwar nach 37 Würfeln jedes Feld exakt 1 Mal belegt, die jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeiten würden dadurch jedoch manipuliert.

Bei der hier vorgestellten Modifikation tritt die geforderte Ähnlichkeit der Übergangsmatrizen ein, wenn eine große Anzahl von Perioden betrachtet wird oder wenn die zu generierende Folge einen großen Umfang besitzt. Analog hierzu sind in dem Roulette-Beispiel gemäß dem Gesetz der großen Zahlen annähernd gleiche Häufigkeiten erst nach großen Vielfachen von 37 Würfeln zu finden. Dieses Prinzip wird bei den nachfolgend eingesetzten Generierungsmethoden genutzt, um keinen Eingriff in die natürlichen Reihenfolgen der Umkehrpunkte vornehmen zu müssen. Die auf diesem Prinzip basierende Vorgehensweise wird hier "Automatische Selektion" genannt.

4.4.1.3 Automatische Selektion

Um die oben erwähnte statistische Ähnlichkeit zwischen einer als "statistische Vorlage" dienenden gemessenen Folge und der synthetischen Folge zu erhalten, werden iterativ vollständige Perioden generiert und jeweils mit der gemessenen Folge verglichen. Die aktuell "beste" synthetische Folge wird durch eine neu generierte Folge ersetzt, falls diese "besser" ist. Die Generierung wird abgebrochen, wenn nach n Iterationen die momentan "beste" synthetische Folge nicht durch eine "bessere" ersetzt werden konnte. Die Zahl n der Iterationen ist dabei beliebig und wird später besprochen.

Um beurteilen zu können, welche synthetische Folge "besser" ist als eine andere, werden Ähnlichkeits- bzw. Verschiedenheitsmaße benötigt, welche die Qualität einer Folge hinsichtlich der geforderten Eigenschaften durch eine reelle Zahl wiedergeben. Hierzu kann im schon erwähnten Programm wahlweise entweder die Clustermatrix aus Abs. 4.3.3.1 oder das Amplitudenkollektiv der Folgen als Qualitätskriterium betrachtet werden.

Auswahl nach bester Clustermatrix:

Bei der Auswahl nach bester Clustermatrix wird die Summe der betragsmäßigen Differenzen der sich entsprechenden Matrixelemente der Clustermatrizen der gemessenen Folge *CLUORG* und der generierten Folge *CLUSYN* als Verschiedenheitsmaß $V_{Cluster}$ festgelegt.

$$V_{Cluster} = \sum k \cdot \left| (CLUORG_{ijk})^{\Psi} - (CLUSYN_{ijk})^{\Psi} \right| \quad (4.9)$$

mit i = Zeilennummer (Klasse), j = Spaltennummer (Abstand) und k = Ebenennummer (Clusterumfang) gemäß Abs. 4.3.3.1. Die Differenzen aus den Elementen der höheren Ebenen werden entsprechend höher gewichtet, da sie mehrere zusammenhängende Umkehrpunkte repräsentieren. Zusätzlich werden die Summanden mit einem Exponenten Ψ versehen. Ist der Exponent größer als 1, fällt eine örtliche Abweichung stärker auf und es wird schließlich die Folge als beste gewählt, deren Abweichungen eher gleichmäßig auf alle Matrixelemente verteilt sind. Ein Exponent Ψ kleiner als 1 bewirkt das Gegenteil.

Auswahl nach bester Kollektivform:

Legt man der Auswahl die beste Kollektivform zugrunde, werden für die Folgen die Kollektive nach einer Rainflow-Zählung ermittelt. Anschließend wird die Summe der betragsmäßigen Differenzen der Schwingspiele der sich entsprechenden Kollektivstufen als Verschiedenheitsmaß $V_{kollektiv}$ betrachtet.

$$V_{Kollektiv} = \sum \left| \log(h_{i,org}) - \log(h_{i,syn}) \right| \quad (4.10)$$

mit h_i als Anzahl der Schwingspiele der Kollektivstufe i . Dabei werden die Logarithmen der Lastwechselzahlen betrachtet, um ebenfalls die großen Doppelamplituden, welche in der Regel in geringer Zahl vorhanden sind, gegenüber der "Masse" an kleinen Doppelamplituden hinreichend zu berücksichtigen.

Dank der Entwicklung der Rechnerleistung ist die Realisation vieler Iterationen innerhalb einer kurzen Zeit möglich. Eine kurze Folge, beispielsweise aus einem Tagesschrieb mit ca. 15.000 Umkehrpunkten, lässt sich über Nacht mehr als 50.000 mal durch einen handelsüblichen Rechner (PENTIUM III / 750MHz) generieren. Grundsätzlich gilt jedoch: Je länger eine Folge ist um so weniger Iterationen sind erforderlich, um akzeptable Ergebnisse zu erhalten (Gesetz der großen Zahlen).

4.4.1.4 Generierung auf Grundlage der mehrstufigen Übergangsmatrix

Betriebsbeanspruchungen aus Einzelfolgen oder z.B. die Beanspruchungszeitreihe der Zugfahrt nach Abb. 4.13 erfolgen nach einem bestimmten Muster. Dieses Muster kann bei

der Generierung besser berücksichtigt werden, wenn mehrstufige Übergangsmatrizen verwendet werden (Abs.4.3.3.2). Die Vorgehensweise ist ähnlich der Vorgehensweise mit der gewöhnlichen Übergangsmatrix. Der Unterschied besteht darin, dass zur Bestimmung eines neuen Umkehrpunkts nicht nur der aktuelle Umkehrpunkt als Ausgangsklasse betrachtet wird, sondern das gesamte Pfadstück über die zuvor generierten Punkte. Es werden also nicht nur die Markov'schen Übergangshäufigkeiten zwischen dem aktuell zu generierenden Umkehrpunkt und dem unmittelbar davor liegenden Umkehrpunkt betrachtet, sondern auch die Übergangshäufigkeiten weiter zurückliegender Punkte.

Die Generierungsmethode wird anhand eines Beispiels veranschaulicht: Nach der statistischen Vorlage der Umkehrpunktfolge in Abb. 4.14 soll eine synthetische Folge generiert werden. Zur Generierung eines neuen Umkehrpunkts sollen die 4 zuvor generierten Umkehrpunkte berücksichtigt werden. In Abb. 4.26 sind die 4 Ebenen der mehrstufigen Übergangsmatrix aus Abb. 4.20 dargestellt. Abb. 4.27 zeigt eine mögliche Konstellation, bei der entschieden werden soll, wie die Folge fortzuführen ist. Da der Pfad zuletzt über die Umkehrpunkte der Klassen 9-0-10-6 führte, werden dementsprechend die Zeile 6 der Matrix aus Ebene 1(Markovmatrix 1), Zeile 10 der Matrix aus Ebene 2, Zeile 0 der Matrix aus Ebene 3 und die Zeile 9 der Matrix aus Ebene 4 gemäß Abb. 4.26 berücksichtigt. Zur Bestimmung des nächsten Umkehrpunktes werden nun die Statistiken der Übergänge ausgehend von jedem der 4 Punkte zum neuen Punkt berücksichtigt, indem die Übergangshäufigkeiten der oben erwähnten relevanten Zeilen addiert werden (Abb. 4.28 unterste Zeile). Das Vorgehen ist angelehnt an die Vorgehensweise bei neuronalen Netzen, wo der Aktivierungszustand A eines Neurons i durch die Summe der Outputs O_j der angeschlossenen Neuronen ermittelt wird. Die Outputs können dabei mit Faktoren W_{ij} gewichtet werden.

$$A_i = \sum_j W_{ij} \cdot O_j \quad (4.11)$$

Demnach entspricht ein Neuron einer Zielklasse und der Aktivierungszustand A einer absoluten Übergangshäufigkeit zu dieser Klasse. Es findet keine Wichtung statt, d.h. $W_{ij} = 1,0$. Zur näheren Einführung in die Theorie der neuronalen Netze wird auf [MAZZ 92] verwiesen.

In einem nächsten Schritt werden die unmöglichen Übergänge aus der Zeile der Summen (bzw. aus der Zeile der Aktivierungszustände) ausgeschlossen. Ein unmöglicher Übergang liegt immer dann vor, wenn mindestens einer der Summanden in einer Spalte der Tabelle nach Abb. 4.28 Null ist. Der neue Umkehrpunkt wird unter Maßgabe der übriggebliebenen Häufigkeiten in der Summenzeile nach der Monte-Carlo-Methode gewählt. Im vorliegenden Fall ist das Ziel eindeutig, da nur eine Klasse zur Auswahl übrig geblieben ist.

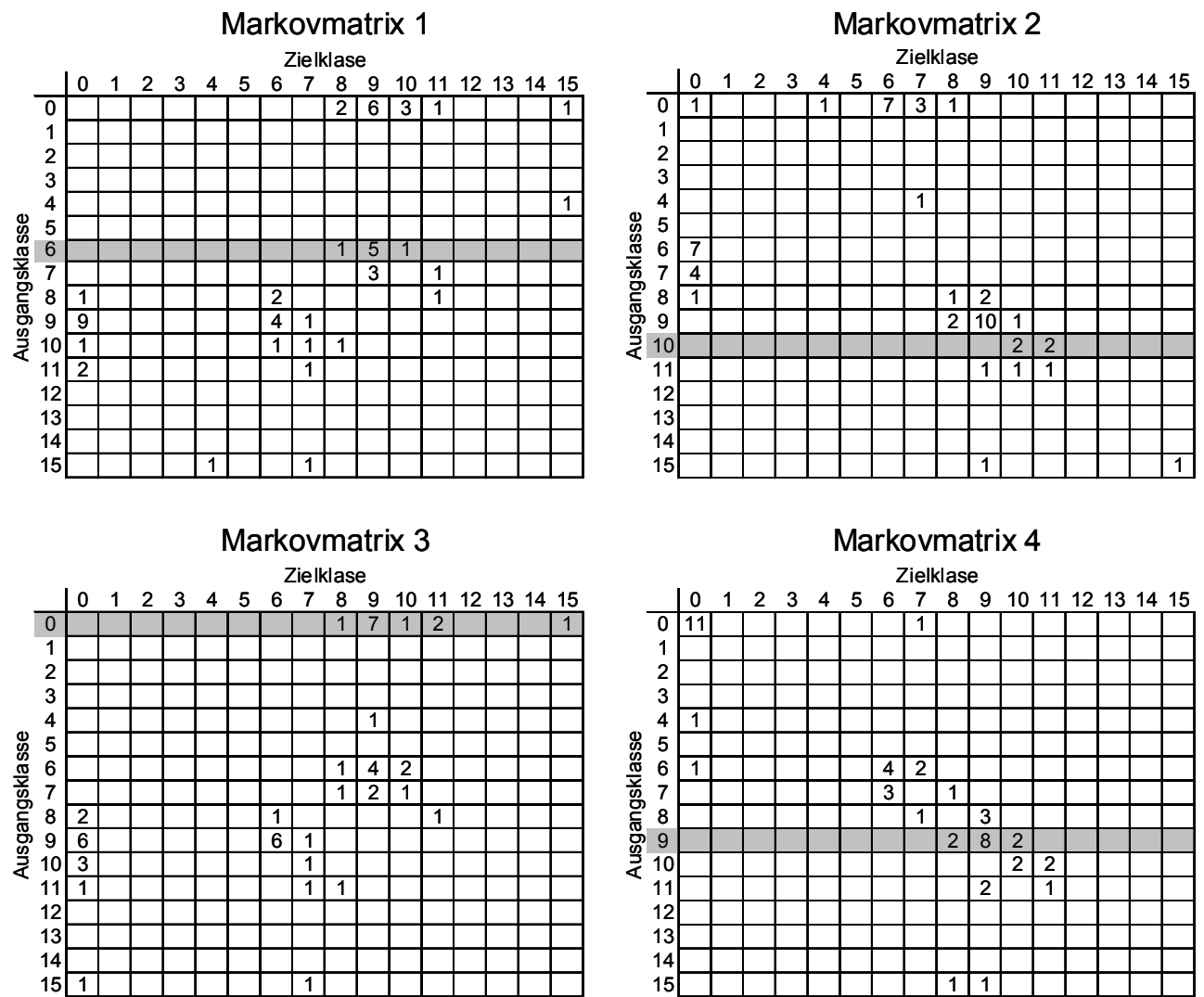


Abb. 4.26 Ebenen der mehrstufigen Übergangsmatrix der Umkehrpunktfolge nach Abb. 4.14, die in Abb. 4.20 als Histogramme dargestellt sind.

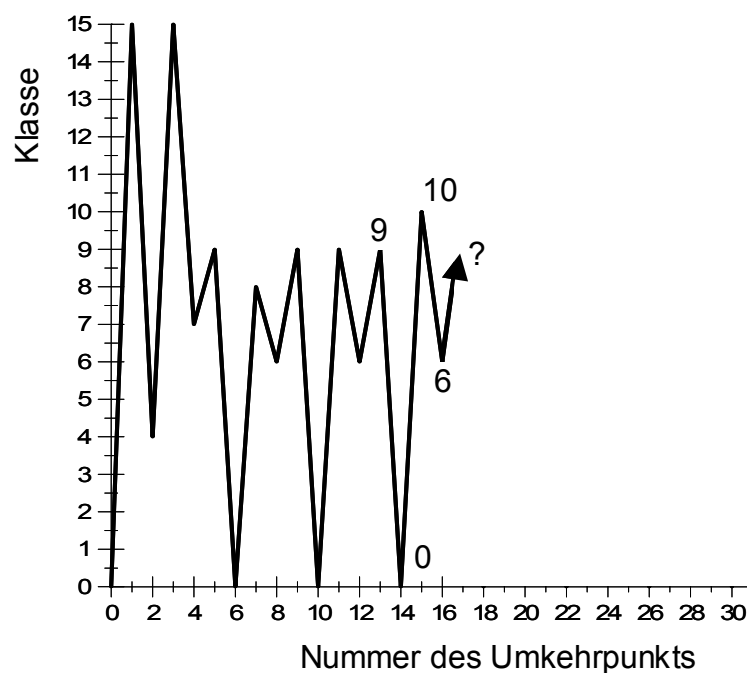


Abb. 4.27 Teil einer generierten Folge

Zielklasse	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Matrix 1 (Zeile 6)									1	5	1	0				0
Matrix 2 (Zeile 10)									0	0	2	2				0
Matrix 3 (Zeile 0)									1	7	1	2				1
Matrix 4 (Zeile 9)									2	8	2	0				0
Σ									4	20	6	4				1

Abb. 4.28 Relevante Zeilen für die Sequenz 9-0-10-6; Ausschluss unmöglicher Ziele

4.4.1.5 Generierung mit Hilfe des Snake-Algorithmus

Auch bei dieser Methode werden die Umkehrpunkte wie bisher als (Klassen-) Ziele sukzessiv von einem Zufallsgenerator bestimmt. Die statistisch korrekte Wiedergabe der Reihenfolgen der Umkehrpunkte aus Messungen bleibt weiter das vorrangige Ziel. "Richtige" Häufigkeiten der Übergänge ergeben sich dann automatisch. Zur Berücksichtigung der Reihenfolgen wird in jedem Generierungsschritt die Konstellation der Umkehrpunkte am aktuellen Ende der synthetischen Folge als Muster erfasst und als Entscheidungsgrundlage für die Wahl des neuen Ziels verwendet. Wird dieses Muster, das aus einer Sequenz von n Umkehrpunkten besteht, als die Eigenschaft des neu zu generierenden Umkehrpunkts (Ziels) betrachtet, lässt sich dessen n -dimensionaler Merkmalsvektor wie folgt darstellen:

$$M_{\text{neuer Umkpt.}} = \begin{pmatrix} \text{Klassennr. Sequenzanfang} \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \text{Klassennr. Sequenzende} \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

Die Anzahl der Klassen als Menge der möglichen Ziele bildet die Menge der Gruppenvariablen. Es wird zuvor eine erhärtete Stichprobe gemäß Abs. 4.3.2.3 erhoben. Die Zuordnung des neu zu wählenden Umkehrpunkts zu einer der Gruppen erfolgt auf der Grundlage des zum Umkehrpunkt gehörenden Merkmalsvektors. Unter Maßgabe der erhärteten Stichprobe erfolgt die Zuordnung wieder über Randomisation nach der Monte-Carlo-Methode.

Zur Mustererfassung wird der sog. Snake-Algorithmus eingesetzt. Der Snake-Algorithmus wird i.d.R. zur künstlichen Bilderkennung, insbesondere zur Kantenerkennung eingesetzt. [KASS 88]. Mit "Snake" wird dabei eine *elastische Kurve* bezeichnet, die durch mehrere *Stützpunkte* definiert wird. Die zu erkennenden Kanten eines Objekts werden dadurch erfasst, dass sich die "Schlange" iterativ über die Eckpunkte spannt.

Das Prinzip des Snake-Algorithmus wird hier auf Umkehrpunkte angewandt. Es wird zunächst dazu verwendet, ein bestimmtes Muster an jeder Stelle der gemessenen Umkehrpunktfolge wiederzufinden, um für dessen Fortsetzung eine Statistik aufzustellen (vgl. Abb. 4.29 oben und mitte). Die Durchführung dieses Schrittes für jedes mögliche Muster entspricht der Erhebung einer erhärteten Stichprobe (vgl. Abs. 4.3.2.3).

Der Snake-Algorithmus wird ebenfalls eingesetzt, um während der Generierung das Muster am aktuellen Ende der Umkehrpunkte zu erfassen, für dessen Fortsetzung dann die entsprechende Statistik zugrunde gelegt wird. Das Prinzip der Generierungsmethode ist in Abb. 4.29 veranschaulicht. In dem Beispiel ist $n=3$, entsprechend der Sequenz aus drei Punkten 2-5-2. Die Übergangswahrscheinlichkeit für die möglichen Ziele ist im Bild rechts unten dargestellt und durch entsprechend große Punkte vor dem "Snake" symbolisiert.

Zur Erhebung der erhärteten Stichprobe ist ein $(n+2)$ -dimensionaler Datensatz erforderlich, n Dimensionen für den Merkmalsvektor plus zwei Dimensionen für die Häufigkeitsverteilung des Ziels. Für $n=1$ entspricht die Methode der in Abs. 4.4.1.2 beschriebenen Vorgehensweise mit der gewöhnlichen Übergangsmatrix (die Sequenz besteht aus einem Umkehrpunkt). Nach demselben Prinzip sind in Abs. 4.3.3.6 die typischen Reihenfolgen der Fahrzeuge mit $n = 2$ erfasst worden (vgl. Abb. 4.25).

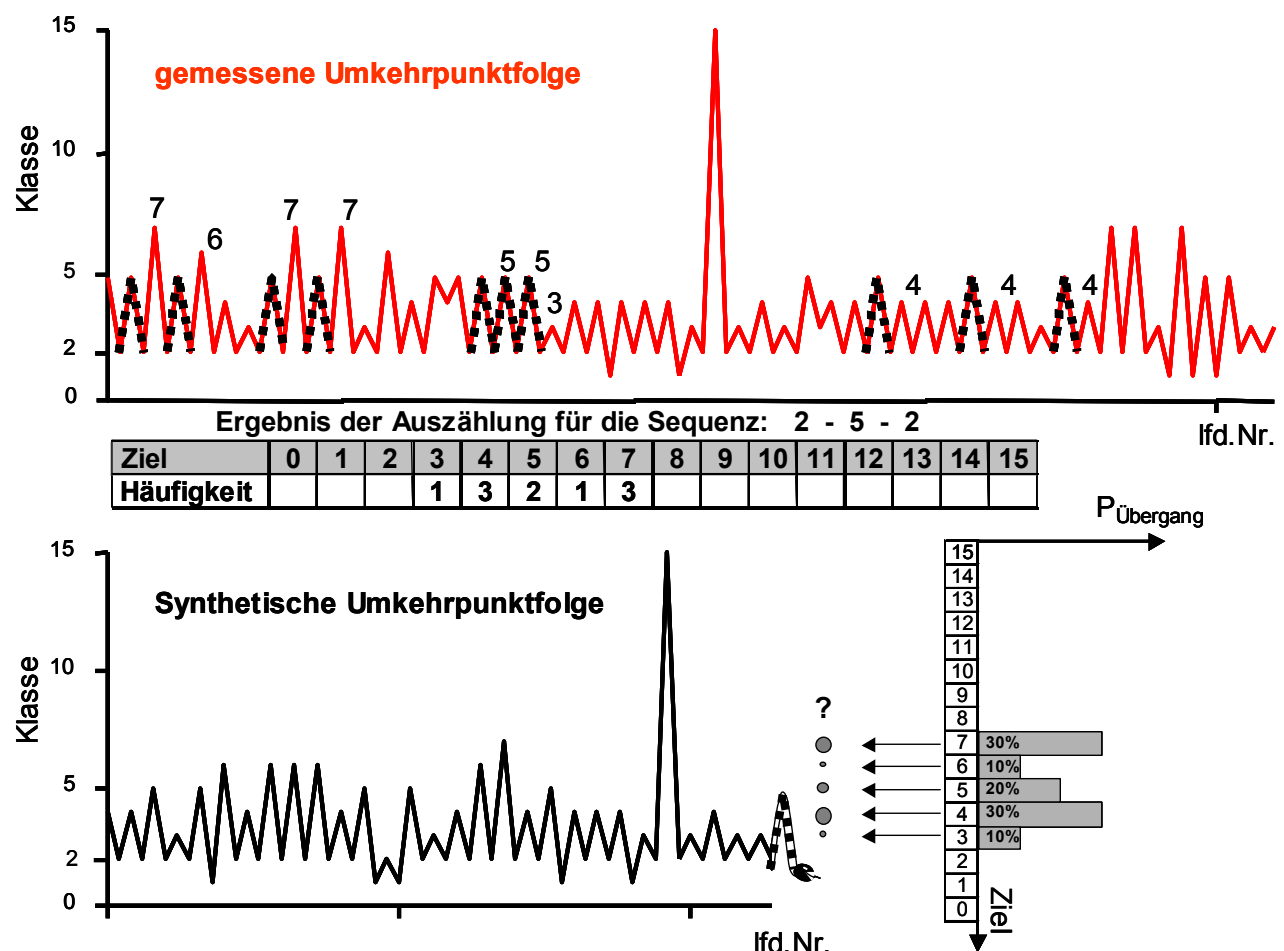


Abb. 4.29 Prinzip der Generierungsmethode mit Hilfe des Snake-Algorithmus

Die bisherigen Studien zeigten, dass in der Regel nur kurze Sequenzlängen betrachtet zu werden brauchen, d.h. eine Sequenzlänge zwischen 3 bis 5 war bisher völlig ausreichend. Zu lange Sequenzen bewirken, dass die gemessene Umkehrpunktfolge abschnittsweise nur kopiert wird, da beispielsweise eine zu lange Sequenz als "Unikat" nur an einer einzigen Stelle mit der gemessenen Umkehrpunktfolge übereinstimmt und somit nur auf eine einzige Art und Weise fortgeführt werden kann. In der Häufigkeitsverteilung der Ziele steht in diesem Fall nur ein Ziel zur Auswahl. Allerdings ist selbst bei einer Sequenzlänge von 10 Punkten die Wahrscheinlichkeit, dass die gesamte gemessene Umkehrpunktfolge nur kopiert wird, immer noch verschwindend gering. Beispielsweise zeigte ein Test, dass bei einer Folge von 15.000 Umkehrpunkten, immer noch über 20 Fälle existieren, in denen mehrere Ziele verschiedener Wahrscheinlichkeiten zur Auswahl stehen. Die Wahrscheinlichkeit, dass die synthetische Folge 20 mal zufällig identisch wie die gemessene Folge fortgeführt wird, beträgt dann

$$P_{Kopie} = \prod_{i=1}^{20} p_i, \quad (4.13)$$

wenn p_i jedes Mal die Wahrscheinlichkeit für die identische Fortführung der synthetischen Folge ist. Dabei ist zu beachten, dass wegen der großen Sequenzlänge p_i in diesem Fall häufig 0,5 beträgt.

Sinnvollerweise ist bei der Festlegung der Sequenzlänge der durch eine typische Lastquelle erzeugte Signalverlauf als Entscheidungskriterium zugrunde zu legen: Man beobachtet beispielsweise das Signal, das ein einzelnes Fahrzeug in der Umkehrpunktfolge erzeugt. Die Sequenzlänge ist dann so zu wählen, dass die Sequenz das Signal des einzelnen Fahrzeugs umfasst. Somit wird bei der Generierung automatisch die Aufeinanderfolge von Fahrzeugen statistisch nachgeahmt. Führen die an einem Prozess beteiligten Lastquellen in der Umkehrpunktfolge auf unterschiedlich lange Sequenzen, ist die längste Sequenz maßgebend. Für eine Beanspruchungszeitreihe des Querträgers der untersuchten Autobahnbrücke ist eine Sequenzlänge bestehend aus 3 Punkten ausreichend (Abb. 4.17), für die Beanspruchungszeitreihe einer Zugüberfahrt gemäß Abb. 4.14 sind es 4 Punkte.

Beim Snake-Algorithmus kann bei kurzen Umkehrpunktfolgen ebenfalls die Methode der automatischen Selektion gemäß Abs. 4.4.1.3 eingesetzt werden. Unabhängig vom gewählten Algorithmus bietet das unter Abs. 4.4.1.1 erwähnte Programm "ClusterForm" die Möglichkeit zur automatischen Selektion grundsätzlich an. Falls keine automatische Selektion erwünscht ist, wird der dafür vorgesehene Parameter (vgl. Abb. 4.30: "... Iterationen") auf 1 gesetzt.

ClusterForm

Dateiverwaltung | Parameter-Generierung | Parameter-Schadensberechnung | Parameter-Clusterzählung

Generierung nach

☒ Markov - Algo Ebenenanzahl der Übergangsmatrix 4

☐ Snake - Algo Sequenzlänge 4

Auswahl nach bester

☒ Clustermatrix Exponent 1

☐ Kollektivform

Länge des Ersatzzeitschrieb / Länge der Originalfolge 1

Abbruch bei Nichtverbesserung nach 1000 Iterationen

Simulation starten 0%

Abb. 4.30 Screen shot des Generierungsprogramms „ClusterForm“

4.4.1.6 Bewertung der Generierungsmethoden

Eine Parameterstudie mit einer Folge von ca. 15.000 Umkehrpunkten hat gezeigt, dass das Verfahren mit dem Snake-Algorithmus bereits nach weniger als 10 Iterationen bedeutend bessere Ergebnisse liefert als die anderen zwei vorgestellten Verfahren nach 1000 Iterationen. Die Qualität der Ergebnisse wurde anhand der Clustermatrix bzw. des Kollektivs gemäß Abs. 4.4.1.3 bewertet.

Das einfache Verfahren mit der gewöhnlichen Übergangsmatrix gemäß Abs. 4.4.1.2 ist zwar in der Lage nach ca. 100.000 Iterationen eine synthetische Folge mit einer sehr guten Übereinstimmung der Kollektivformen zu generieren (vgl. Syn-3 in Abb. 4.40), bei einer weiteren Betrachtung können jedoch deutliche Unterschiede in den Clustermatrizen festgestellt werden (Abb. 4.48). Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass mit Hilfe der gewöhnlichen Übergangsmatrix die Reihenfolgen nicht hinreichend genau berücksichtigt werden.

Unter Zugrundelegung einer mehrstufigen Übergangsmatrix gemäß Abs. 4.4.1.4 konnte selbst nach 100.000 Iterationen kein befriedigendes Ergebnis erzielt werden. Bei dieser Vorgehensweise werden einerseits mehrere Übergangsmatrizen benötigt, um bei der Entscheidung für einen neu zu wählenden Umkehrpunkt auch die Informationen über die zurückliegenden Umkehrpunkte zu berücksichtigen, andererseits kann durch die Wahl von

mehreren Übergangsmatrizen das System - ähnlich wie bei neuronalen Netzen - "überfüttert" werden. Die Anzahl der Ebenen wurde zwischen 2 und 10 variiert. Mit zunehmender Ebenenzahl konnte teilweise eine negative Tendenz beobachtet werden. Diese Vorgehensweise wurde daher zunächst nicht weiter verfolgt. Es ist dennoch denkbar, dass evtl. durch eine Gewichtung der Beiträge aus den Übergangsmatrizen und durch eine Modifikation des Generierungsalgorithmus der Ansatz mit mehrstufigen Übergangsmatrizen bessere Ergebnisse liefert, als die hier vorgestellte Vorgehensweise.

Die Qualität der generierten Folgen wurde nicht nur anhand der Clustermatrix bzw. des Kollektivs bewertet. Zur Validierung wird unter Abs. 4.5 die Qualität durch eine rechnerische Lebensdauerbestimmung und anhand von Lebensdauerversuchen an identischen Testkörpern bewertet.

4.4.2 Vorgehensweise bei bestehenden Bauwerken

Bei bestehenden Bauwerken liegen in der Regel keine Beanspruchungszeitreihen aus der Vergangenheit vor, so dass diese anhand von Verkehrsdaten, welche für das Bauwerk beschafft oder geschätzt werden können, zu rekonstruieren sind. Unter Schätzung ist hier die Nutzung von Erkenntnissen aus ähnlichen oder vergleichbaren Fällen zu verstehen. Die in Abs. 4.3.3.3 vorgestellten Lastverteilungen gehören zu den am meisten verbreiteten Verkehrsdaten, die nötigenfalls auch durch Schätzungen bestimmt werden können. Diese Informationen können entweder über statistische Verkehrsämter bezogen werden oder mit Hilfe von bereits vorhandenen WIM-Daten (weighting-in-motion) an ähnlich beanspruchten Bauwerken im Untersuchungsgebiet geschätzt werden (vgl. [Bund 89]). Das WIM-Verfahren wird inzwischen bereits seit über 20 Jahren zur Bestimmung von Achslasten bzw. Fahrzeuggesamtgewichten eingesetzt [Mose 79]. Dabei werden die Achslasten entweder durch in der Fahrbahn installierte Sensoren erfasst oder mit Hilfe von Messungen der Beanspruchungen an ausgewählten Details und mit Hilfe eines Bauwerksmodells bestimmt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass die Lastverteilungen nach der Durchführung von Langzeitmessungen am Untersuchungsobjekt aus der beobachteten Verkehrsentwicklung rückwärts geschätzt werden.

Die bauwerksspezifische Verkehrscharakteristik der Vergangenheit kann durch Auswertung aktueller Messungen in guter Näherung geschätzt werden, da sich viele der unter Abs. 4.3.3.4 genannten bauwerksspezifischen Faktoren im Laufe der Zeit wenig bzw. sich die topographischen Faktoren i.d.R. gar nicht ändern.

Diese Informationen werden zusammen mit einem kalibrierten Modell des Bauwerks verwendet, um die Beanspruchungszeitreihen der Vergangenheit zu rekonstruieren. Bei der

Generierung wird im ersten Schritt nur eine Gewicht-Zeit-Ereignisfolge erzeugt, die dann als Input für ein Bauwerksmodell verwendet wird.

Zur Generierung der Gewicht-Zeit-Ereignisfolge werden zunächst durch einen Zufalls-generator Fahrzeugtypen in der statistisch "richtigen" Reihenfolge erzeugt. Dieses geschieht analog zu dem Verfahren mit dem Snake-Algorithmus. Der Entscheidung für einen neu zu generierenden Fahrzeugtyp liegt immer eine der Verteilungen gemäß der Datenmatrix in Abb. 4.25 zugrunde. Hierzu wird wieder die Monte-Carlo-Methode eingesetzt, nach welcher der Fahrzeugtyp unter Maßgabe der Häufigkeiten einer zugrundegelegten Verteilung gewählt werden kann. Die Wahl der Verteilung aus der Datenmatrix hängt immer von den beiden unmittelbar zuvor generierten Fahrzeugtypen ab (erster Fahrzeugtyp = Zeilennummer; zweiter Fahrzeugtyp = Spaltennummer). Somit werden die Reihenfolgen - hier ausgehend von 2 aufeinanderfolgenden Fahrzeugen - statistisch korrekt berücksichtigt. Analog hierzu ist auch eine Berücksichtigung von mehreren aufeinander folgenden Fahrzeugen mit entsprechend mehrdimensionalen Matrizen denkbar.

Dieses Vorgehen geht ebenso wie das Generierungsverfahren mit dem Snake-Algorithmus auf die Diskriminanzanalyse zurück. Demnach hängt die Auftretenswahrscheinlichkeit eines neuen Fahrzeugs von den zuvor erschienenen Fahrzeugen ab, wenn tatsächlich ein bestimmtes Muster in der Auftretensreihenfolge von Fahrzeugen existiert. Daher werden die ersten n Fahrzeuge einer Folge (hier ist $n = 2$) quasi als Merkmale des neu zu erscheinenden Fahrzeugs betrachtet. Der Merkmalsvektor M , dessen Komponenten jeweils eine der möglichen Ausprägungen "Typ 1", "Typ 2", "Typ 3" bzw. "Typ 4" haben können, lässt sich wie folgt darstellen:

$$M_{\text{neues Fahrzeug}} = \begin{pmatrix} \text{erstes Fahrzeug} \\ \text{zweites Fahrzeug} \\ \dots \\ n - \text{tes Fahrzeug} \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

Die Realisation des Vektors M entscheidet über die Wahl der entsprechenden Verteilung. Die Zuordnung des zunächst unbekannten neuen Fahrzeugs zu einer der vier möglichen Gruppen, d.h. wie die Sequenz fortgesetzt werden könnte, erfolgt dann über Randomisierung unter Maßgabe der gewählten Verteilung.

Die Gewichte der Fahrzeuge werden ebenfalls nach der Monte-Carlo-Methode unter Zugrundelegung der Verteilungen nach Abb. 4.22 gewählt. Analog wird der zeitliche Abstand zwischen den Fahrzeugen unter Berücksichtigung der Datenmatrix in Abb. 4.24 festgelegt.

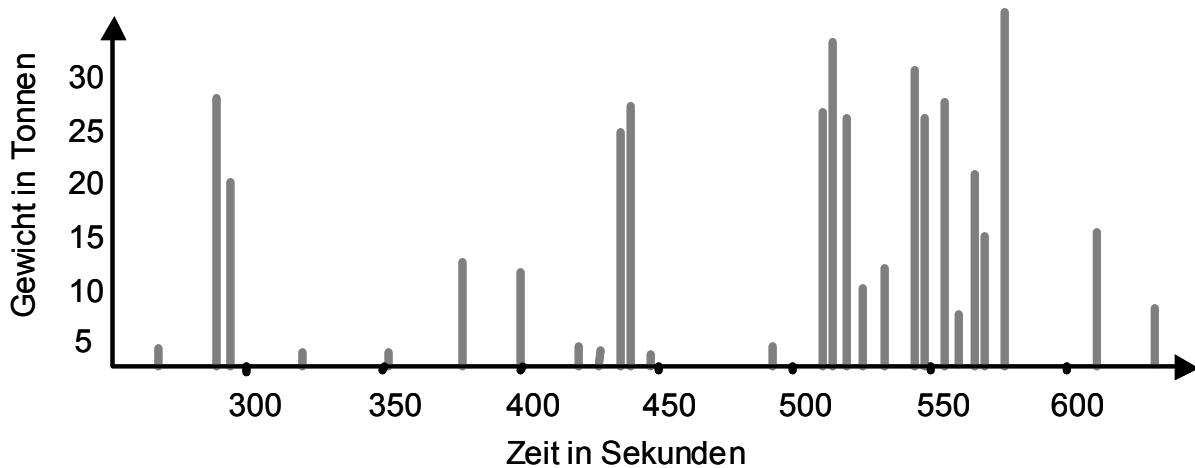


Abb. 4.31 Input für das mechanische Modell einer Straßenbrücke

Somit entsteht ein Fahrzeugstrom als Input für ein Bauwerksmodell (Abb. 4.31), welcher je nach Anforderungen bzw. Systemverhalten entweder nach einer genauen Berechnung mit dem Zeitschrittverfahren [SCHÜ 91], dem modalen Verfahren [PEIL 01], oder falls dynamische Effekte vernachlässigbar sind, mit Hilfe der Auswertung einer Einflusslinie [CLOR 86] eine Beanspruchungszeitreihe liefert. Fahrzeuggeometrien und Achsabstände können dabei anhand der Fahrzeugtypennummer gemäß den Herstellerangaben berücksichtigt werden.

Abb. 4.32 zeigt den Screen shot eines einfachen Programms, welches durch schrittweise Auswertung einer Einflusslinie eine Beanspruchungszeitreihe erzeugt. Die Fahrbahnrauigkeit, dynamische Effekte und die Fahrzeug-Bauwerk-Interaktion werden dabei nicht simuliert. Die Vorgehensweise bei der Erfassung der genannten Effekte ist in [PEIL 01] vorgestellt.

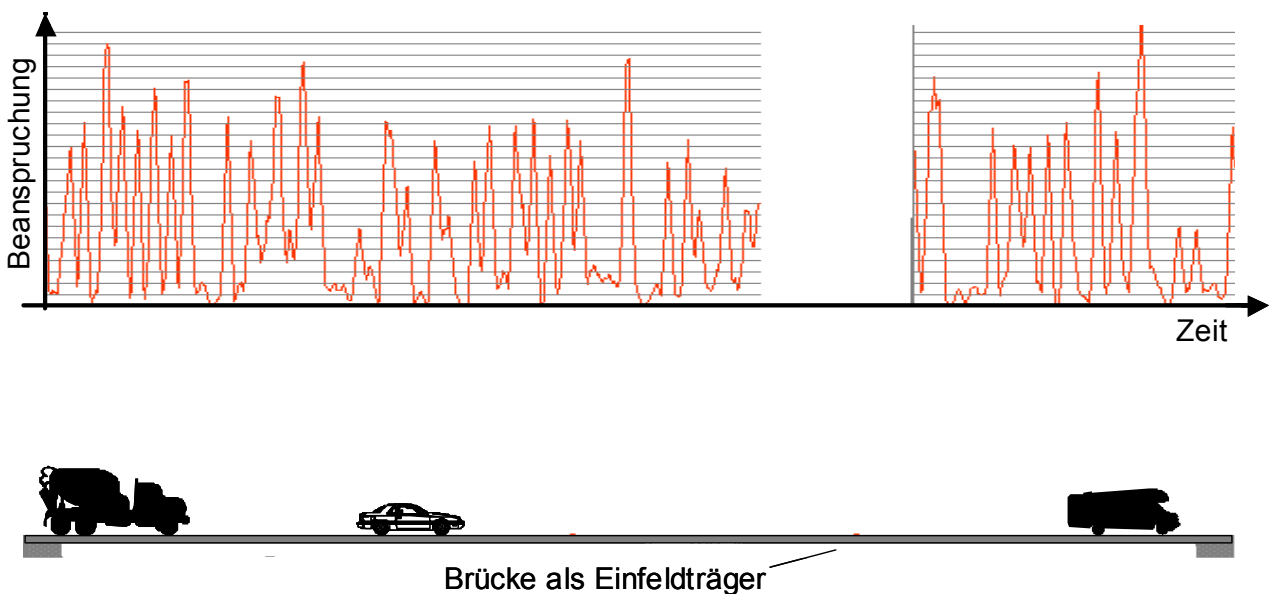


Abb. 4.32 Screen shot eines Programms zur Signalgewinnung durch Auswertung von Einflusslinien (Fahrzeuge symbolisch dargestellt)

4.5 Validierung synthetischer Beanspruchungszeitreihen

4.5.1 Versuchskonzept

Um die Eignung der synthetischen Umkehrpunktfolgen für die experimentelle Lebensdauerbestimmung von neuen Bauwerken zu untersuchen, wurden an gleichwertigen Proben Ermüdungsversuche mit einer gemessenen Umkehrpunktfolge sowie verschiedenen statistisch entsprechenden synthetischen Umkehrpunktfolgen durchgeführt.

Mit Ausnahme der verwendeten Beanspruchungszeitreihen wurden alle übrigen Parameter, die einen Einfluss auf die Lebensdauer haben können, weitgehend konstant gehalten. Es wurden Proben verwendet, welche hinsichtlich Werkstoff, Gestaltung und Bearbeitung nahezu identisch sind. Ferner wurden zur Erlangung einer hohen statistischen Aussagekraft mindestens 18 Proben pro Versuchsreihe getestet. Dieses Vorhaben konnte durch die in Abb. 4.33 dargestellte Versuchsanordnung, entsprechend der 8 Proben gleichzeitig getestet wurden, in einer angemessenen Zeit durchgeführt werden.

Ein Problem bei Zufallslastenversuchen ist oft der regelungsbedingte Unterschied zwischen der Sollwertfunktion und der tatsächlichen Prüfkraft. Die Größe dieses Fehlers

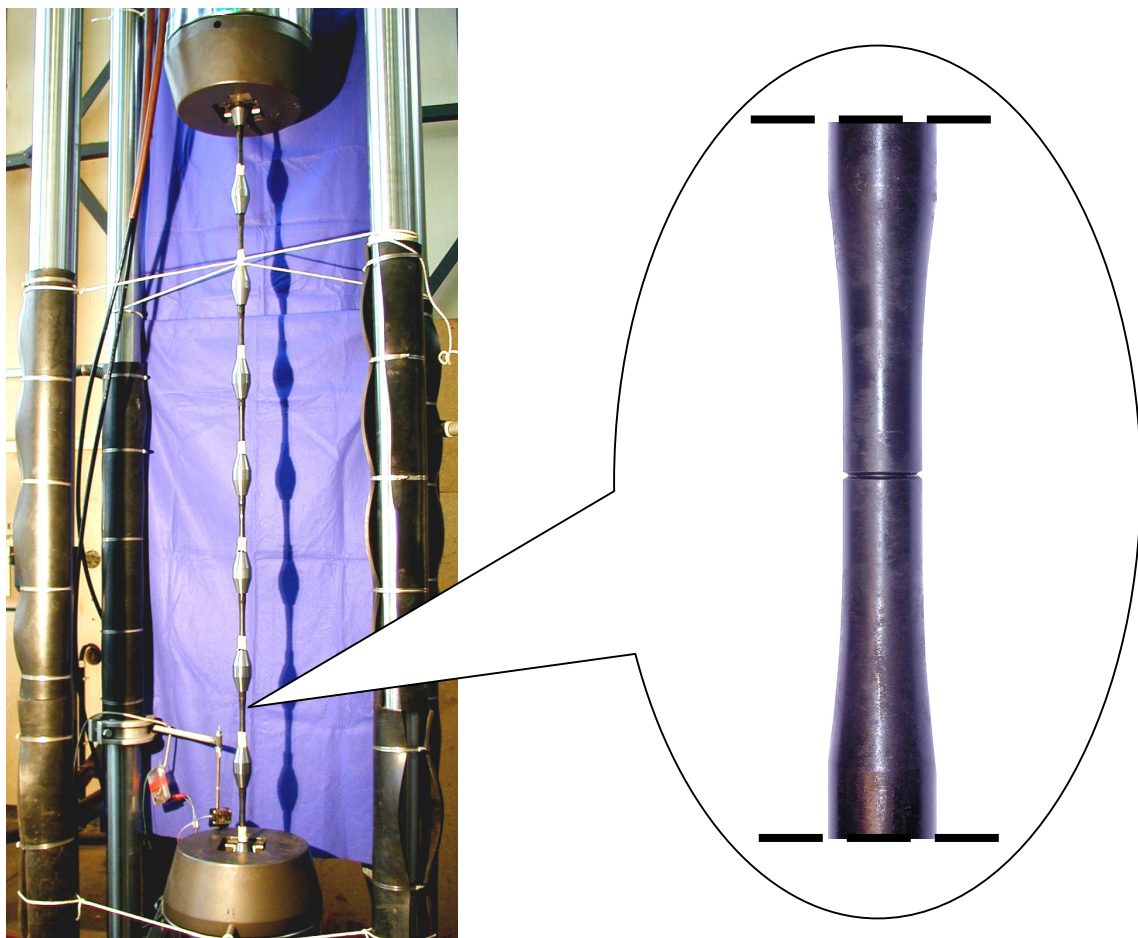


Abb. 4.33 Versuchsaufbau zum gleichzeitigen Test von 8 Proben

ist in der Regel eine Pseudozufallsgröße. Sie ist abhängig von der Leistungsfähigkeit der hydraulischen Prüfeinrichtung, der gewählten Belastung, der Belastungsrate und den eingestellten Regelparametern (den sog. Proportional-, Integral-, und Differenzialanteilen, kurz: P/I/D-Anteilen). Um diesen Fehler weitgehend zu eliminieren, wurden zuvor Pilotversuche mit dem Ziel durchgeführt, die Prüfmaschine für die vorliegende Konstellation zu "tunen", d.h. die Regelparameter P/I/D für eine bestimmte Probensteifigkeit und Belastungsrate zu optimieren. Ferner verfügt die eingesetzte Reglungssoftware ("Test Star" der Firma MTS) über die Funktion SAC (Spectrum Amplitude Controle), bei der die Prüfmaschine quasi durch ihre eigenen Fehler lernt und die Sollwertvorgabe entsprechend korrigiert. Eine konstante Steifigkeit des Gesamtprüfstücks (hier die 8 Proben) muss dabei natürlich gewährleistet sein. Daher wurde eine gebrochene Probe für die Fortsetzung des Versuchs immer durch eine neue Probe oder einen Dummy ersetzt.

Bei der gewählten relativ geringen Belastungsrate von 100 kN/sec blieb im Mittel die Anzahl der bei einer Fehlertoleranz von $\pm 0,5 \text{ kN}$ verpassten Endwerte unter $0,005 \%$, d.h. von 100.000 Umkehrpunkten wurden also 5 mit einem größeren Fehler als $0,5 \text{ kN}$ angefahren. Zur Kontrolle wurden die wichtigsten Parameter für jeden zehnten Umkehrpunkt in einer Protokolldatei gespeichert. Abb. 4.34 stellt exemplarisch den Vergleich zwischen der Sollwertvorgabe und den "tatsächlichen" Kräften anhand eines Ausschnitts aus der Protokolldatei grafisch dar.

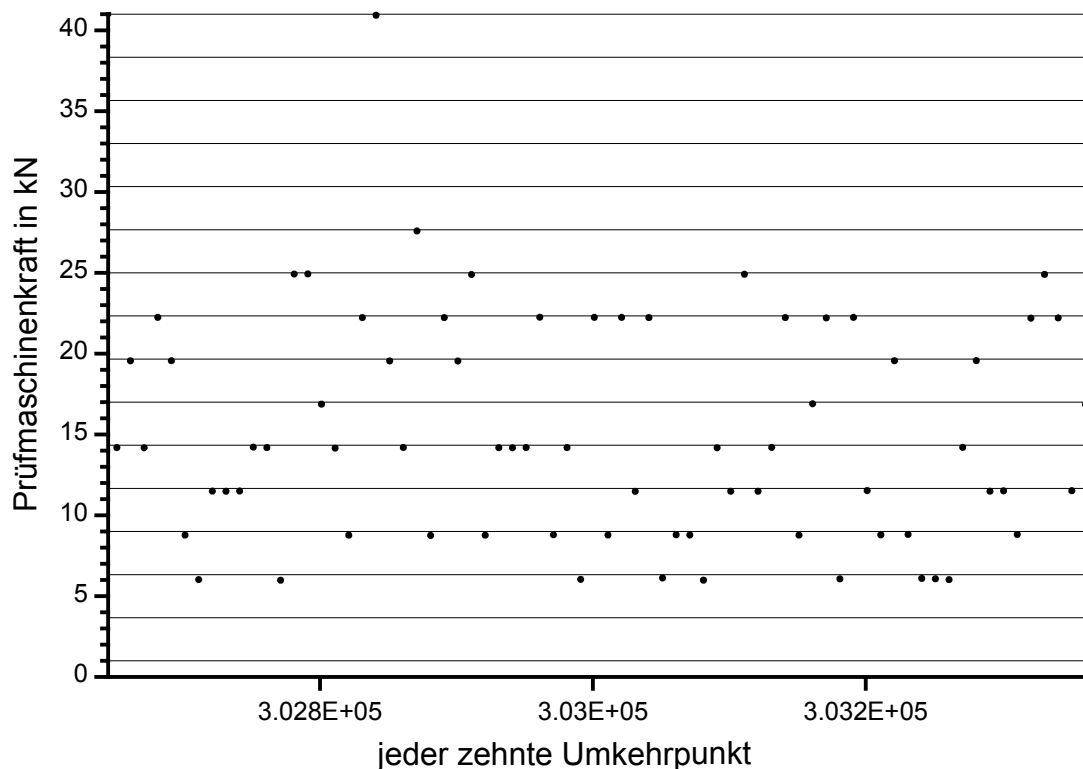


Abb. 4.34: Sollwertvorgaben im Vergleich zu Istwerten. Die horizontalen Linien entsprechen jeweils einem Sollwert (= Offset + Kalibrierfaktor · Klassennummer)

4.5.2 Probenform und Probenwerkstoff

Für die Versuchsdurchführung wurden CNC-gedrehte Rundproben verwendet. Die Rohlinge zu den Rundproben wurden in Walzrichtung aus einer 20 mm dicken Grobblechplatte aus Baustahl S355 J2 G3 gemäß DIN EN 10 025 entnommen.

Die Rundproben lagen bereits aus einem anderen Forschungsvorhaben in ausreichender Zahl vor [KRÜM 98]. Sie wurden für die anstehenden Untersuchungen durch eine Umlaufkerbe in Probenmitte modifiziert. Zur Kraftübertragung bzw. Kopplung mit anderen Proben wurden die Enden mit Gewinden versehen (Abb. 4.35).

Die chemische Zusammensetzung der Schmelze lt. Abnahmeprüfzeugnis 3.1 B gemäß DIN EN 10024 ist in Tabelle 4.1 aufgeführt. Die Streckgrenze beträgt 361 N/mm^2 , die Zugfestigkeit 495 N/mm^2 und die Bruchdehnung 29 %.

<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Al</i>	<i>N</i>
0,11	0,3	1,47	0,012	0,01	0,044	0,011

Tabelle 4.1 Chemische Zusammensetzung in Gew.-%

Die Maßabweichung des Prüfquerschnitts ist sehr gering. In Abb. 4.36 sind die Durchmesser der Prüfquerschnitte im Wahrscheinlichkeitsnetz dargestellt. Die Überschreitungswahrscheinlichkeiten wurden nach der Beziehung von Rossow bestimmt (vgl. Abs. 4.5.4, Gl. (4.16)). Die äußerst geringe Abweichung des Mittelwerts um $0,004 \text{ mm}$ vom Nennmaß ist vermutlich auf den Einfluss der Umgebungstemperatur zurückzuführen.

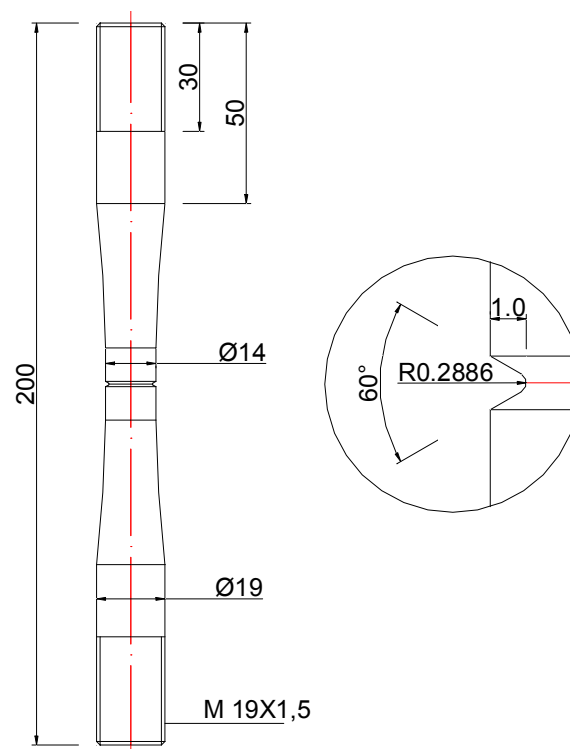


Abb. 4.35 Probengeometrie

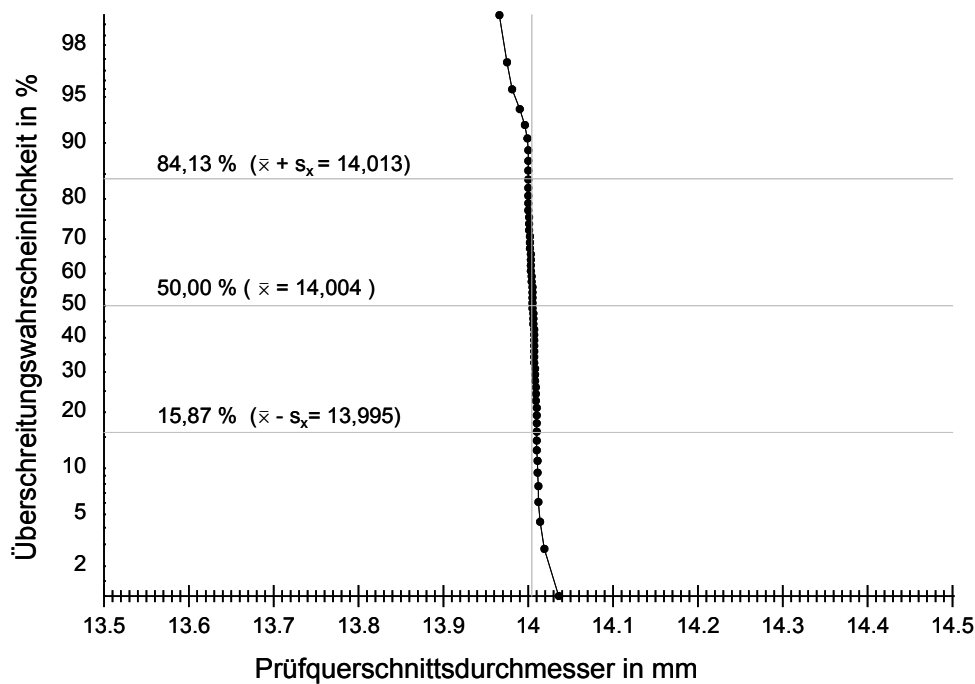


Abb. 4.36 Überschreitungswahrscheinlichkeiten der Probendurchmesser im Prüfquerschnitt

Zur Vermessung des Kerbquerschnitts (Durchmesser im Kerbbereich) wird zur Maßabnahme bei dem relativ engen Kerbradius ein sehr scharfer Abnehmer benötigt, um auf den Kerbgrund gelangen zu können. Eine gewöhnliche Schieblehre wäre viel zu grob. Bei einem sehr scharfen Maßabnehmer besteht allerdings die Gefahr, den Kerbgrund der verhältnismäßig weichen Probe mit dem in der Regel gehärteten Messwerkzeug zu verletzen. Ein optisches Messverfahren stand leider nicht zur Verfügung. So wurden für die Durchmesser im Kerbbereich die während der Herstellung abgelesenen Werte der elektronischen Anzeige der Drehbank zugrunde gelegt. Diese Anzeige gibt den Durchmesser des Drehstücks als den zweifachen Abstand zwischen der Spitze des Schneidwerkzeugs und der Drehachse an. Die tatsächlich hergestellten Durchmesser im Kerbbereich dürften eine ähnliche Standardabweichung aufweisen wie die Prüfquerschnittsdurchmesser nach Abb. 4.36. Eine Standardabweichung von $9,0 \mu\text{m}$ ist hinsichtlich der gestellten Genauigkeitsanforderung vernachlässigbar.

Die Kerbschärfe wurde vorab durch eine FE-Modellierung und anhand von einschlägigen Formeln [NEUB 85] derart bestimmt, dass ein Versagen am kritischen ersten Gewindegang ausgeschlossen werden konnte. Die Kerbschärfe wurde möglichst hoch gewählt, um eine geringe Streuung der Bruchlastspielzahlen zu erhalten. Die maximale Kerbschärfe ($\alpha_k=3,99$) ergibt sich bei dem durch den Drehmeißel vorgegebenen Kerböffnungswinkel von 60° und einem Kerbradius von rund $2,9 \text{ mm}$ bei einer Kerbtiefe von $t = 1,0 \text{ mm}$. Abb. 4.37 zeigt den berechneten Spannungsgradienten für eine Nennspannung von $1,0 \text{ N/mm}^2$ im ungekerbten Bereich.

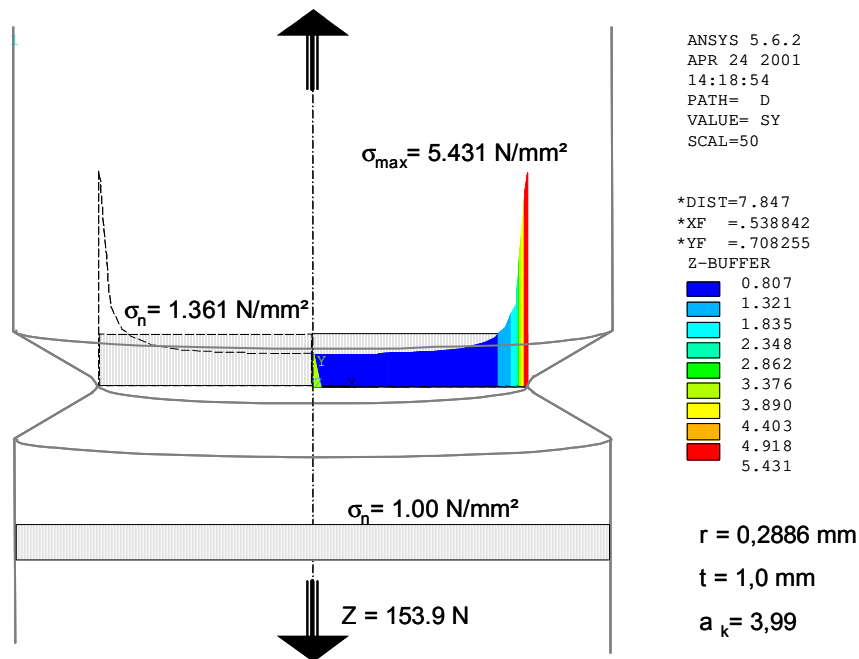


Abb. 4.37 Spannungsgradientenverlauf am Kerbgrund

Wie oben angesprochen, konnten die Streuungen der Abmessungen durch die mechanische Fertigung der Proben in der Drehbank weitgehend minimiert werden. Der Einfluss von unvermeidbaren, fertigungsbedingten Unterschieden wurde durch verschiedene Maßnahmen klein gehalten. So wurde beispielsweise das Schneidwerkzeug jeweils nach der Fertigung von 30 Proben ausgetauscht. Die Zusammenstellung eines Probensatzes für eine Versuchsreihe folgte nicht nach der laufenden Nummer, welche den Proben entsprechend der Herstellungsreihenfolge zugeteilt wurde, sondern systematisch durchmischt. Um die Eigenspannungen aus dem Herstellvorgang zu minimieren, wurden die Proben außerdem nach der Fertigung bei 625°C eine Stunde lang im Ofen stehend spannungsarmgeglüht und bis zur vollständigen Abkühlung im Ofen belassen.

4.5.3 Beanspruchungszeitreihe

Eine gemessene Beanspruchungszeitreihe des Tagesverkehrs der Autobahnbrücke BS-Wenden - im folgenden kurz als "Messschrieb" bezeichnet - wurde als "statistische Vorlage" für die synthetischen Beanspruchungszeitreihen gewählt. Nach der Aufbereitung enthält die Beanspruchungsfolge ca. 15.000 Umkehrpunkte. Die Folge wurde bis zum Bruch zyklisch wiederholt. Abb. 4.38 zeigt das Amplitudenkollektiv mit dem Umfang $H=7683$ in bezogener Darstellung. Die Kraft der Prüfmaschine wurde so gewählt, dass die Nennspannung im Kerbquerschnitt bei der größten Belastungsstufe Klasse "15" mit 41 kN etwa der Streckgrenze des Materials entsprach. Die Versuche wurden im Zugschwellbereich durchgeführt (Klasse "0": 1 kN).

Die Betriebsdauern für drei synthetische Beanspruchungszeitreihen wurden mit der Betriebsdauer für den Messschrieb rechnerisch mit Hilfe der linearen Schadensakkumulation und außerdem experimentell verglichen. Die synthetischen Beanspruchungszeitreihen Syn_1 und Syn_2 wurden nach der Generierungsmethode mit Hilfe des Snake-Algorithmus unter Berücksichtigung einer Sequenz bestehend aus 3 Umkehrpunkten generiert (vgl. Abs. 4.4.1.5). Sie wurden jeweils entsprechend der besten Kollektivform (Syn_1) bzw. der besten Clustermatrix (Syn_2) nach der automatischen Selektion bestimmt (vgl. Abs.4.4.1.3). Die dritte synthetische Beanspruchungszeitreihe (Syn_3) wurde unter Zugrundelegung einer gewöhnlichen Übergangsmatrix generiert (vgl. Abs. 4.4.1.2). Der Test mit Syn_3, bei dem die Reihenfolgeeffekte nicht hinreichend genau simuliert sind, soll zum einen zeigen, wie notwendig die Berücksichtigung von Reihenfolgeeffekten bzw. Clustern in dem Fall ist, zum anderen, ob die Reihenfolgeeffekte bei der vorliegenden Periodenzahl (Anzahl der Wiederholungen der Teilfolge bis zum Bruch) einen Einfluss auf die Lebensdauer haben. Es ist bekannt, dass Reihenfolgeeffekte mit zunehmender Periodenzahl an Bedeutung verlieren ([ZENN 01], [HAIB 89]). Diesbezüglich sind in der Literatur keine allgemeingültigen quantitativen Angaben zu finden, da das Phänomen von der jeweiligen Lastfolgenkonstellation abhängt, also von Fall zu Fall unterschiedlich großen Einfluss hat.

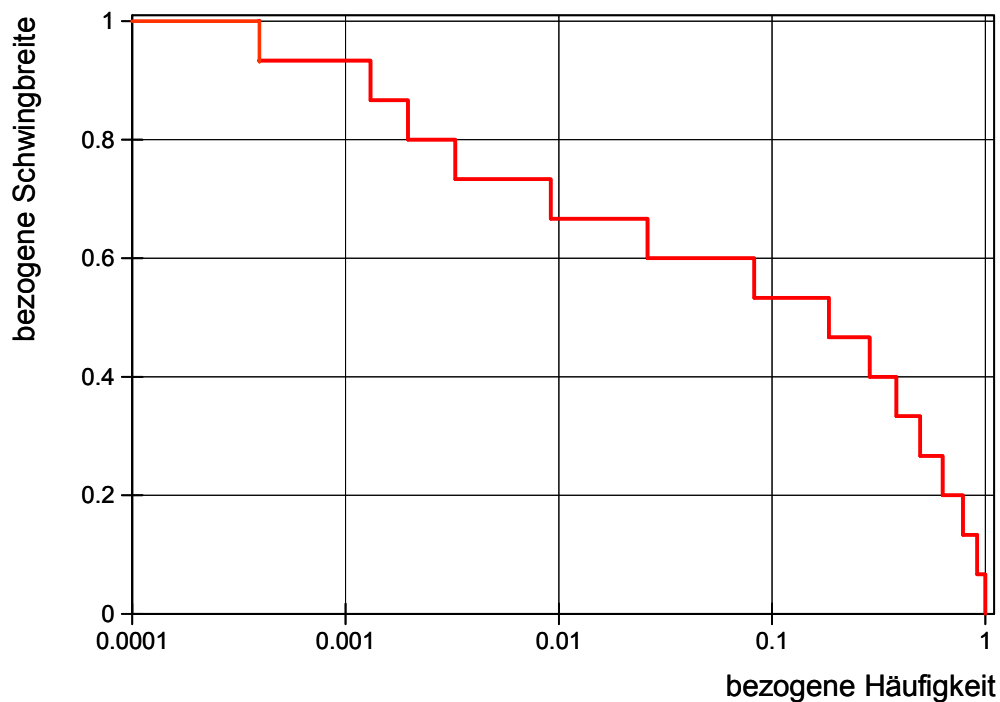


Abb. 4.38 Amplitudenkollektiv der Verkehrsbeanspruchung von einem Tag

Klassen	Mess- schrieb	Snake-Algorithmus				Übergangsmatrix	
		Syn_1	Δ_{syn_1}	Syn_2	Δ_{syn_2}	Syn_3	Δ_{syn_3}
15	3	3	0	5	-2	3	0
14	7	7	0	7	0	7	0
13	5	5	0	7	-2	5	0
12	10	10	0	11	-1	10	0
11	45	45	0	40	5	44	1
10	129	132	-3	123	6	134	-5
9	431	424	7	449	-18	406	25
8	779	767	12	777	2	790	-11
7	782	787	-5	763	19	757	25
6	734	756	-22	738	-4	751	-17
5	855	801	54	875	-20	844	11
4	1035	1063	-28	1037	-2	1010	25
3	1185	1196	-11	1215	-30	1188	-3
2	987	1016	-29	974	13	1022	-35
1	651	626	25	617	34	666	-15

Abb. 4.39 Kollektive der untersuchten Beanspruchungszeitreihen

Die drei synthetischen Folgen sind bei Auswertung nach den konventionellen Zählverfahren hinsichtlich ihres Kollektivs beinahe identisch mit dem Messschrieb. Für diesen Vergleich wurde eine Rainflow-Zählung angewandt. Abb. 4.39 zeigt einen Vergleich der Amplitudenkollektive in tabellarischer Form, wobei die Differenzen der Kollektivstufen in einer gesonderten Spalte angegeben sind. Die Rainflow-Matrizen der generierten Folgen sowie die jeweiligen Differenzen zu der Rainflow-Matrix des Messschriebs können den Anlagen 4.1 bis 4.4 entnommen werden. Da es hier auf einen detaillierten Vergleich der Kollektive ankommt, ist es sinnvoller, die Kollektive nicht wie üblich als Summenhäufigkeitsdiagramme darzustellen, sondern entsprechend Abb. 4.40 die einzelnen Kollektivstufen zu zeigen. Die Übereinstimmung der 4 Kollektive ist sehr gut.

Anschließend wurde die rechnerische Schadenssumme jedes Kollektivs für den Kerbfall 36* aus dem Eurocode 3 nach dem Nennspannungskonzept bestimmt. Kerbfall 36* gilt beispielsweise für Gewindestangen unter axialer Beanspruchung. Dieser Kerbfall kommt der vorliegenden Kerbe in der Rundprobe am nächsten. Außerdem ist es für den anstehenden Vergleich sinnvoll, dass auch die kleinsten Schwingbreiten mit in die Berechnung eingehen und nicht unter dem Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit fallen. Der Kerbfall 36* erfüllt diese Bedingung. Er liegt allerdings für den vorliegenden Fall weit auf der sicheren Seite, da die Kerbradien von Gewinden kleiner sind als der vorliegende Kerbradius. Dieses spielt aber für einen Vergleich der rechnerischen Schadenssummen nur eine untergeordnete Rolle.

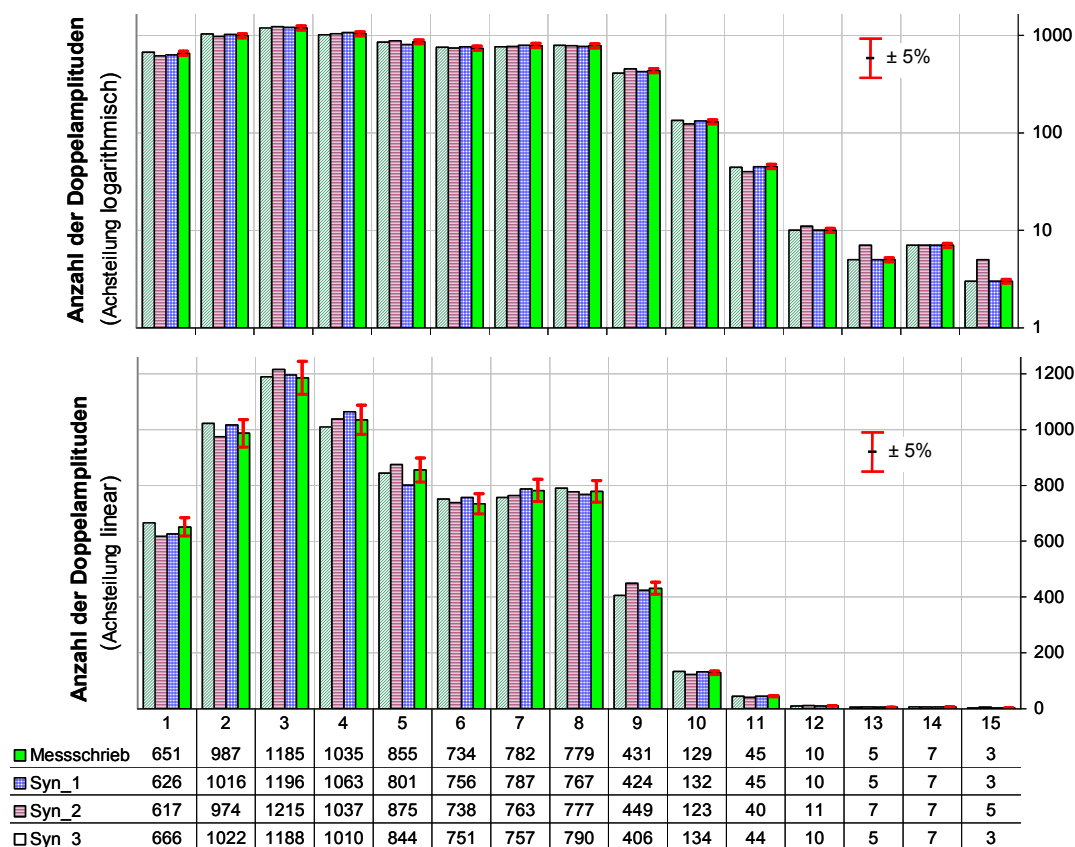


Abb. 4.40 Graphischer Vergleich der Kollektivstufen der untersuchten Beanspruchungszeitreihen

Bei einer Berechnung nach dem Nennspannungskonzept weichen die rechnerischen Schadenssummen der 4 Kollektive maximal 1 % voneinander ab (Abb. 4.41 unten). Dieses Ergebnis überrascht insofern nicht, da für die Berechnungen jeweils nur ein einparametrisches Kollektiv zugrundegelegt wurde. Die Ermittlung der Schadenssummen sollte lediglich zeigen, in welcher Größenordnung sich die bestehenden Kollektivunterschiede auf die Lebensdauer auswirken.

Eine aufwendigere Berechnung unter Zugrundelegung eines zweiparametrischen Kollektivs nach dem Kerbgrundkonzept ergab ein ähnliches Ergebnis (Abb. 4.41 oben). Für die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve wurden die Materialkennwerte hierbei aus [KRÜM 98]

	Messschrieb	Syn_1	Syn_2	Syn_3
Lebensdauer nach Kerbgrundkonzept	44,723	44,868	44,187	45,326
Unterschied zum Messschrieb	0,00%	+ 0,32%	- 1,20 %	+ 1,35 %
Lebensdauer nach EC 3/ Kerbfall 36*	4,932	4,951	4,901	4,982
Unterschied zum Messschrieb	0,00%	+ 0,39%	- 1,63 %	+ 1,01 %

Abb. 4.41 Rechnerische Lebensdauer der untersuchten Beanspruchungszeitreihen bezogen auf den Kollektivumfang

zugrunde gelegt. Zur Berücksichtigung von Mittelspannungen der Schwingbreiten werden Korrelationstabellen an der Stelle von Kollektiven verwendet. Eine Korrelationstabelle entspricht einer unteren Dreiecksmatrix, deren Elemente sich aus der Addition der symmetrisch zu der Hauptdiagonale liegenden Elemente der Rainflow-Matrix ergeben:

$$a_{i,j} + a_{j,i} \Rightarrow a_{i,j} \quad (4.15)$$

wobei i und j der Zeilen- bzw. Spaltenindex der Rainflow-Matrix sind. Die Korrelationstabelle enthält die gleiche Information wie eine sog. Mittelwert-Schwingbreiten-Matrix. Die Korrelationstabellen zu den hier untersuchten Beanspruchungszeitreihen sind zusammen mit den jeweiligen Differenzen zu dem Messschrieb in Anlage 4.5 bis 4.8 gegeben. Bei Syn_3 (dem Zeitschrieb ohne Berücksichtigung der Reihenfolgen) sind leichte Unterschiede zum Messschrieb erkennbar (vgl. Anlage 4.6 bis 4.8, die Differenzen). In der rechnerischen Lebensdauer macht der Unterschied allerdings nur eine Abweichung von 1,35 % aus.

Gemäß dem rechnerischen Ergebnis sind die schädigenden Wirkungen der 4 Beanspruchungszeitreihen sehr ähnlich. Mit den verwendeten Rechenverfahren können jedoch keine Reihenfolgeeffekte berücksichtigt werden. Daher wird nachfolgend ein detaillierter Vergleich der Lebensdauern auf experimenteller Basis vorgenommen. Dabei werden Proben bis zum Bruch jeweils mit einer Beanspruchungszeitreihe beansprucht.

4.5.4 Ergebnis

Die Bruchlastwechselzahlen einzelner Versuchsreihen sind in Abb. 4.42 im Wahrscheinlichkeitsnetz dargestellt. Die Überlebenswahrscheinlichkeiten wurden dabei nach dem Ansatz von Rossow bestimmt [Ross 64]:

$$P_u = \frac{3 \cdot j - 1}{3 \cdot n + 1}, \quad (4.16)$$

wobei j die Ordnungszahl der nach Größe sortierten Bruchlastwechselzahlen ist und n die Versuchsanzahl. Außerdem ist zu jeder Versuchsreihe die entsprechende Streugerade und der Streubereich angegeben. Hierzu wurde eine in [Henn 57] angegebene Methode verwendet. Die Einzelversuchsergebnisse sind in Anlage 4.9 aufgeführt.

Bei den mit Pfeilen markierten schwarzen Punkten für die Versuchsreihe des Messschriebs handelt es sich um fünf Proben, welche durch einen Schaden an der hydraulischen Regelung zerstört wurden. Die Proben hatten zum Zeitpunkt des Ausfalls bereits

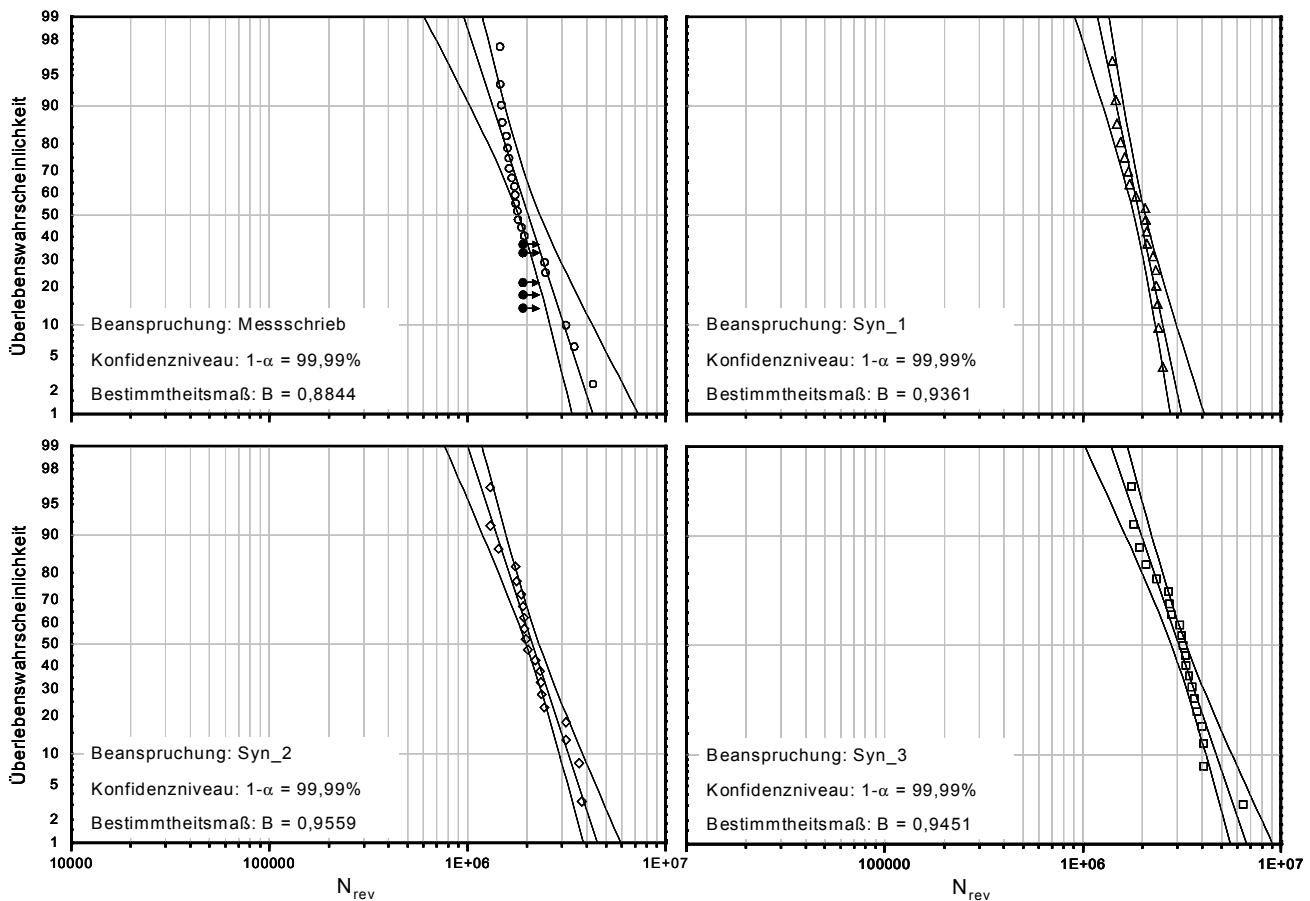


Abb. 4.42 Lastwechselzahlen identischer Proben für verschiedene Beanspruchungszeitreihen Messschrieb, Syn_1, Syn_2 und Syn_3

eine Lastwechselzahl von mehr als $1,9 \cdot 10^6$ ohne einen erkennbaren Anriss überlebt. Für die zerstörten Proben wurden keine konkreten Lastwechselzahlen angenommen. Sie wurden lediglich vor dem Hintergrund, dass sie mindestens $1,9 \cdot 10^6$ Lastwechsel überlebt haben, im Bereich der übrigen ab $1,9 \cdot 10^6$ vorhandenen Lastwechselzahlen eingeordnet (vgl. Anlage 4.9). Die Versuchsbeobachtung wurde also bei der Ermittlung der Überlebenswahrscheinlichkeiten und somit bei der Schätzung der Streugeraden und Streubereiche berücksichtigt.

Zum Vergleich der Ergebnisse sind in Abb. 4.43 alle Versuchsreihen zusammen in einem Diagramm dargestellt. Offensichtlich gibt es kaum einen Unterschied zwischen dem Messschrieb und den synthetischen Beanspruchungszeitreihen Syn_1 und Syn_2. Somit lassen sich die mit Hilfe des Snake-Algorithmus erzeugten synthetischen Beanspruchungszeitreihen hinsichtlich der Übereinstimmung mit der für den Messschrieb bestimmten Lebensdauer als sehr gut einstufen. In Abb. 4.44 sind für alle Versuchsreihen die Ausgleichsgeraden dargestellt. Es fällt auf, dass Syn_2 (Schriebeauswahl nach der besten Clustermatrix) hinsichtlich des Mittelwerts und der Streuung dem Messschrieb sehr ähnlich ist.

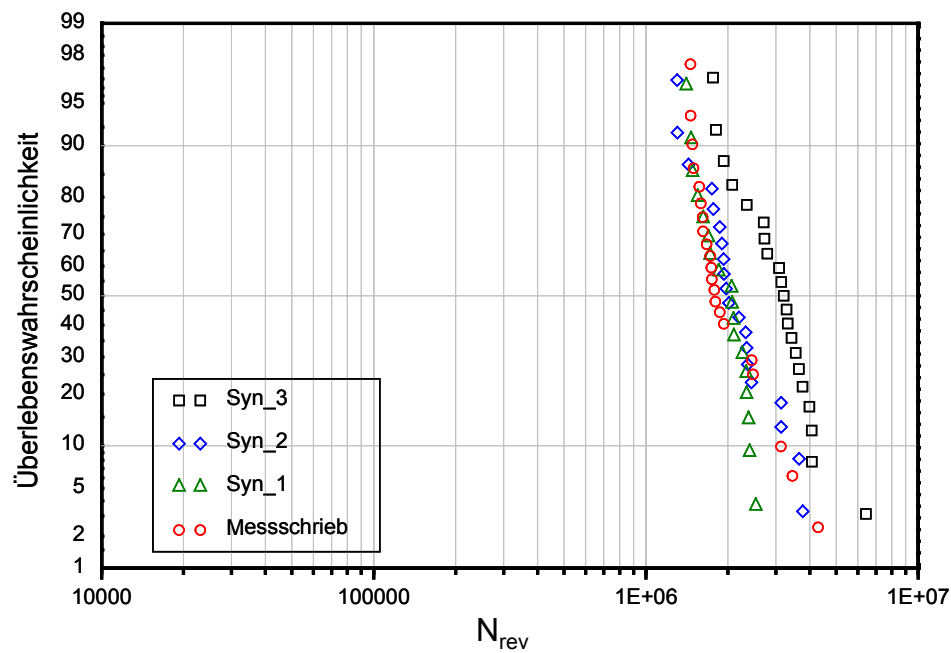


Abb. 4.43 Vergleich der Ergebnisse

Die Versuchsreihe von Syn_1 zeigt eine von den anderen Versuchsreihen abweichende geringere Streuung. Allerdings ist nicht eindeutig erwiesen, dass diese Abweichung auf die Schrieauswahl nach der besten Kollektivform zurückzuführen ist, da die Abweichung noch innerhalb des Zufallsstrebereichs liegt (vgl. Abb. 4.45).

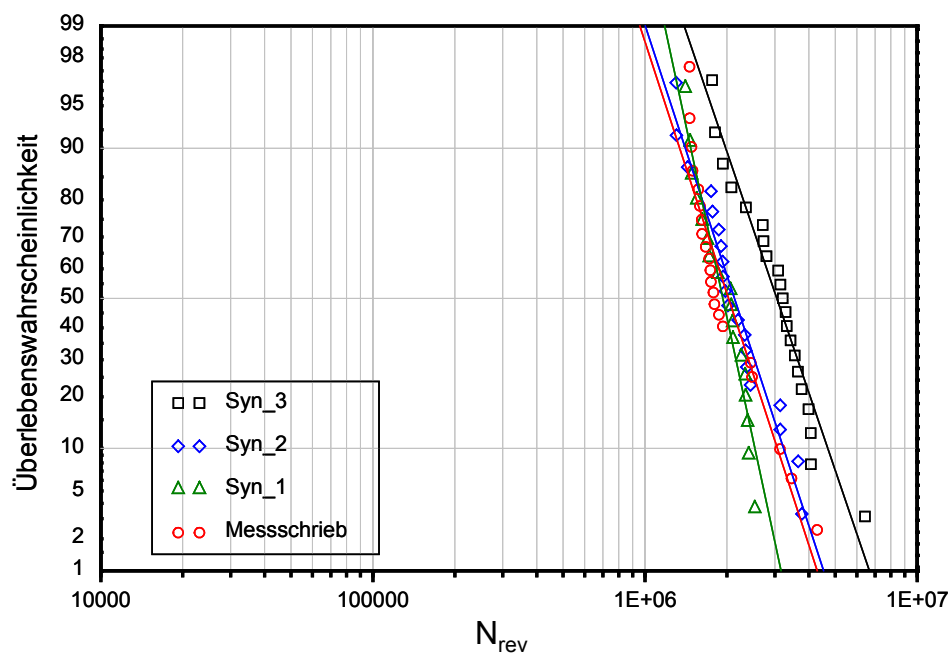


Abb. 4.44 Ausgleichsstreugeraden nach der linearen Regressionsanalyse

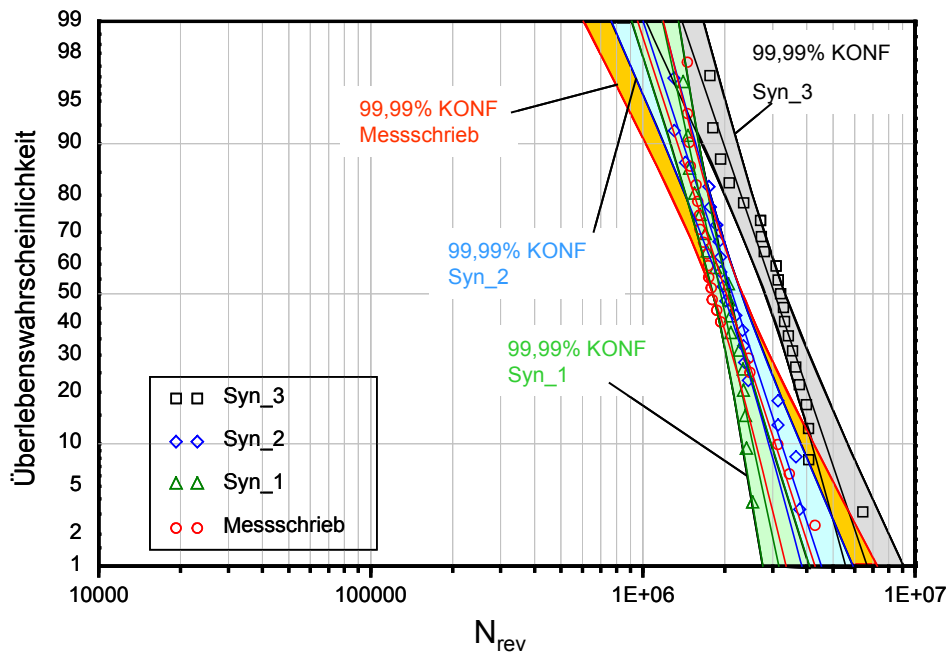


Abb. 4.45 Zufallsstrebereiche der Ausgleichsgeraden der einzelnen Versuchsreihen

Im Gegensatz zu Syn_1 und Syn_2 zeigt Syn_3, der ohne Berücksichtigung der Reihenfolgen und Cluster generiert wurde, eine eindeutige Auffälligkeit. Die Ausgleichsstreugerade von Syn_3 führt nämlich auf eine gegenüber dem Messschrieb 50% höhere Lebensdauer. Der Unterschied des Mittelwertes kann nicht zufällig sein, bzw. durch eine natürliche Streuung der Mittelwerte erklärt werden. Die hinreichend großen Stichprobenumfänge erlauben die Ermittlung von möglichst großen Einzelstrebereichen, die sich dennoch im Bereich der Mittelwerte eindeutig voneinander abgrenzen: Mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von 99,99% bzw. einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,01% ist die Ausgleichsgerade der Versuchsreihe von Syn_3 unterschiedlichen Ursprungs (vgl. Konfidenzniveau nach Abb. 4.45).

4.5.5 Bewertung der Validierung synthetischer Beanspruchungszeitreihen

Ein wichtiges Ziel dieser Arbeit besteht in der Entwicklung eines Verfahrens zur Generierung einer dem betrieblichen Beanspruchungsablauf unmittelbar entsprechenden, zufallsartigen Beanspruchungsfolge. Wie die in Abs. 4.5.4 vorgestellten Versuchsergebnisse belegen, ist es gelungen, durch die Kombination des Snake-Algorithmus mit einer diskriminanzanalytischen Betrachtung dieses Ziel zu erreichen. Hierbei wurde die Methode der automatischen Selektion verwendet (vgl. Abs. 4.4.1.3). Sie wird allerdings in der Praxis bei langen Schrieben nicht benötigt werden, da sich die statistische Ähnlichkeit nach dem Prinzip der großen Zahlen einstellen wird. Der Generierungsalgorithmus zeichnet sich dadurch aus, dass wichtige Reihenfolgen statistisch erfasst und bei der Generierung beachtet werden. Zudem schließt der Algorithmus durch den transparenten Aufbau sehr leicht die Möglichkeit ein, nach den erkannten statistischen Gesetzmäßigkeiten auch eine Extra-

pulation über die durch die Messung erfasste Betriebszeit hinaus vorzunehmen.

Der beachtenswerte Lebensdauerunterschied von Syn_3 gegenüber dem Messschrieb von ca. 50% kann nicht ohne Weiteres als Maßstab für andere Lastwechselbereiche und andere Teilfolgenumfänge gelten. Jedoch ist die Tatsache nachvollziehbar, dass Zufallslastenversuche bei einem ähnlichen Amplitudenkollektiv aufgrund unterschiedlicher Konstellationen der Lastenfolgen sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern können.

Ähnliche Beobachtungen beschreiben GASSNER et al. [GASS 76]. Dabei wurden Ergebnisse aus Lebensdauertests unter einer echten Betriebslastenfolge, dem sog. Betriebslasten-Versuch solchen Ergebnissen gegenübergestellt, die im Labor durch Betriebslasten-Nachfahrversuche gewonnen wurden. Die Betriebsbeanspruchung wurde aus den Vertikalbewegungen einer über mehrere Jahre fahrenden Pkw-Radachse gewonnen. Zusätzlich wurden entsprechende Zufallslastenversuche und Blockprogrammversuche durchgeführt. Dabei zeigten die Betriebslasten-Versuche und Betriebslasten-Nachfahrversuche keine statistisch signifikanten Unterschiede. Bei den Zufallslasten-Versuchen sowie bei den Blockprogrammversuchen wurde dagegen eine deutliche Überschätzung der Lebensdauer festgestellt. Während die Überschätzung der Lebensdauer durch die Blockprogrammversuche nicht überraschte, fehlte für die unerwartete Abweichung der Lebensdauerergebnisse der Zufallslasten-Versuche eine Erklärung.

Die Zufallslasten-Versuche waren mit einer synthetisch erzeugten Beanspruchungszeitreihe als quasistationärer Gauß-Prozeß mit willkürlichen Reihenfolgen durchgeführt worden. Vermutlich wies der zu simulierende Prozess deterministische Anteile auf bzw. er war aufgrund unterschiedlicher Fahrten nur abschnittsweise stationär. Die realen Beanspruchungsverhältnisse konnten offensichtlich mit der synthetisch erzeugten Beanspruchungszeitreihe nicht hinreichend genau wiedergegeben werden.

Die Untersuchungsergebnisse von GASSNER dienten der Klärung der Frage nach der Übereinstimmung von Lebensdauerwerten aus Labor und Betrieb. Diese werden vom HAIBACH wie folgt kommentiert: "Es darf somit der Schluss gezogen werden, dass im Sinne der vorgenannten Fragestellung eine Übertragbarkeit von Betriebsfestigkeitswerten im Grundsatz gegeben ist. Entscheidende Voraussetzung dabei ist, dass die Lebensdauerlinie mit einer dem betrieblichen Beanspruchungsablauf unmittelbar entsprechenden, zufallsartigen Beanspruchungsfolge ermittelt wird. Ergänzende Untersuchungen erscheinen jedoch erforderlich, um festzustellen, nach welchen Kriterien eine zutreffende Sollwertfunktion für Zufallslasten-Versuche erzeugt werden kann" [HAIB 89, S.111]. Die hier vorgestellte Vorgehensweise mit dem Snake-Algorithmus liefert eine solche für Zufallslasten-Versuche geeignete Sollwertfunktion.

Das Ergebnis der hier vorgestellten Untersuchungen zeigt außerdem, dass durch die herkömmlichen Zählverfahren wichtige Informationen über die Konstellation der Lasten verloren gehen, welche einen entscheidenden Einfluss auf die Lebensdauer haben können. Ohne Berücksichtigung dieser Informationen ist die Übereinstimmung einer rechnerisch und einer experimentell ermittelten Betriebsfestigkeit davon abhängig, ob sich günstig und ungünstig wirkende Reihenfolgeeffekte zufällig aufheben oder nicht. Da eine Beanspruchung meist in Form einer Last bzw. Nennspannung vorliegt, werden Spannungs-Dehnungs-Hysteresen unter näherungsweise Berücksichtigung des zyklisch elastisch-plastischen Materialverhaltens anhand von Last- bzw. Nennspannungs-Schleifen bestimmt. Dabei werden die eingangs angesprochenen Eigenspannungszustände im Kerbgrund (vgl. Abb. 3.2) nicht hinreichend erfasst. Ein weiterer Informationsverlust über die Reihenfolgen tritt durch die zweiparametrische Zählung und Speicherung der Beanspruchung in einer Rainflow-Matrix auf.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Clustermatrizen werden ebenso wie die Rainflow-matrizen auf der Last- bzw. Spannungsseite gezählt. Sie enthalten jedoch gewisse Informationen über die Reihenfolgen. Daher tritt bei einem Vergleich der zugehörigen Clustermatrizen der Unterschied von Syn_3, welche ohne hinreichende Berücksichtigung der Reihenfolgen generiert wurde, gegenüber dem Messschrieb deutlicher hervor, als wenn

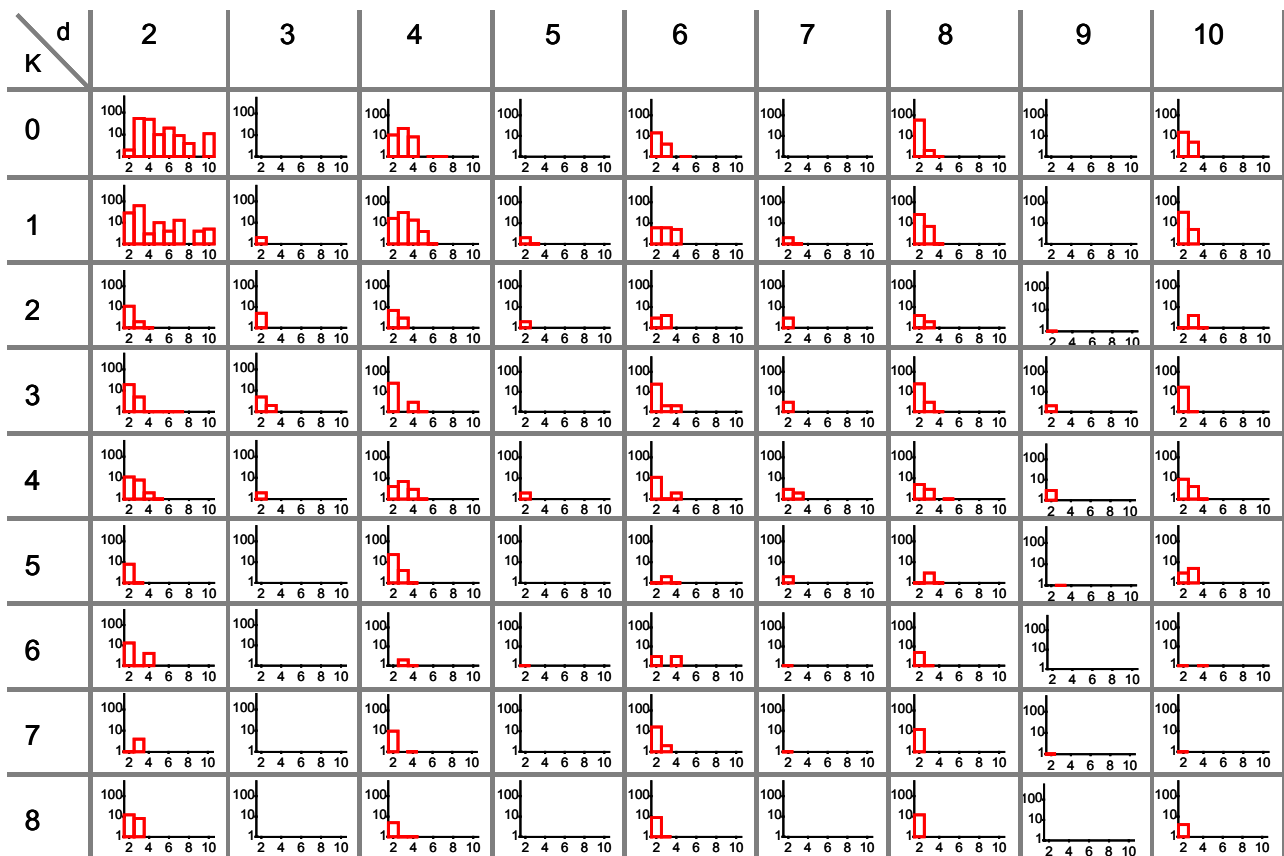


Abb. 4.46 Syn_1-Differenz zum Messschrieb

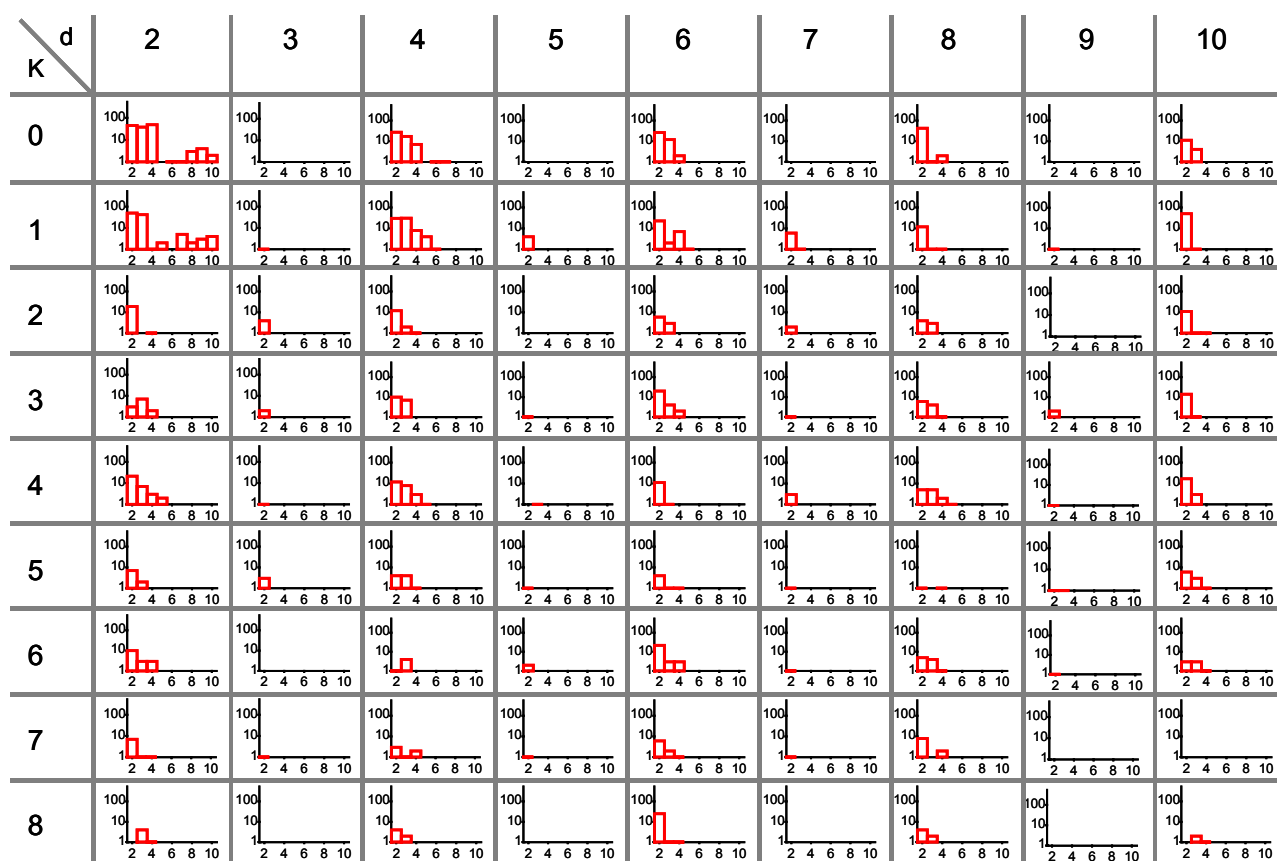


Abb. 4.47 Syn_2-Differenz zum Messschrieb

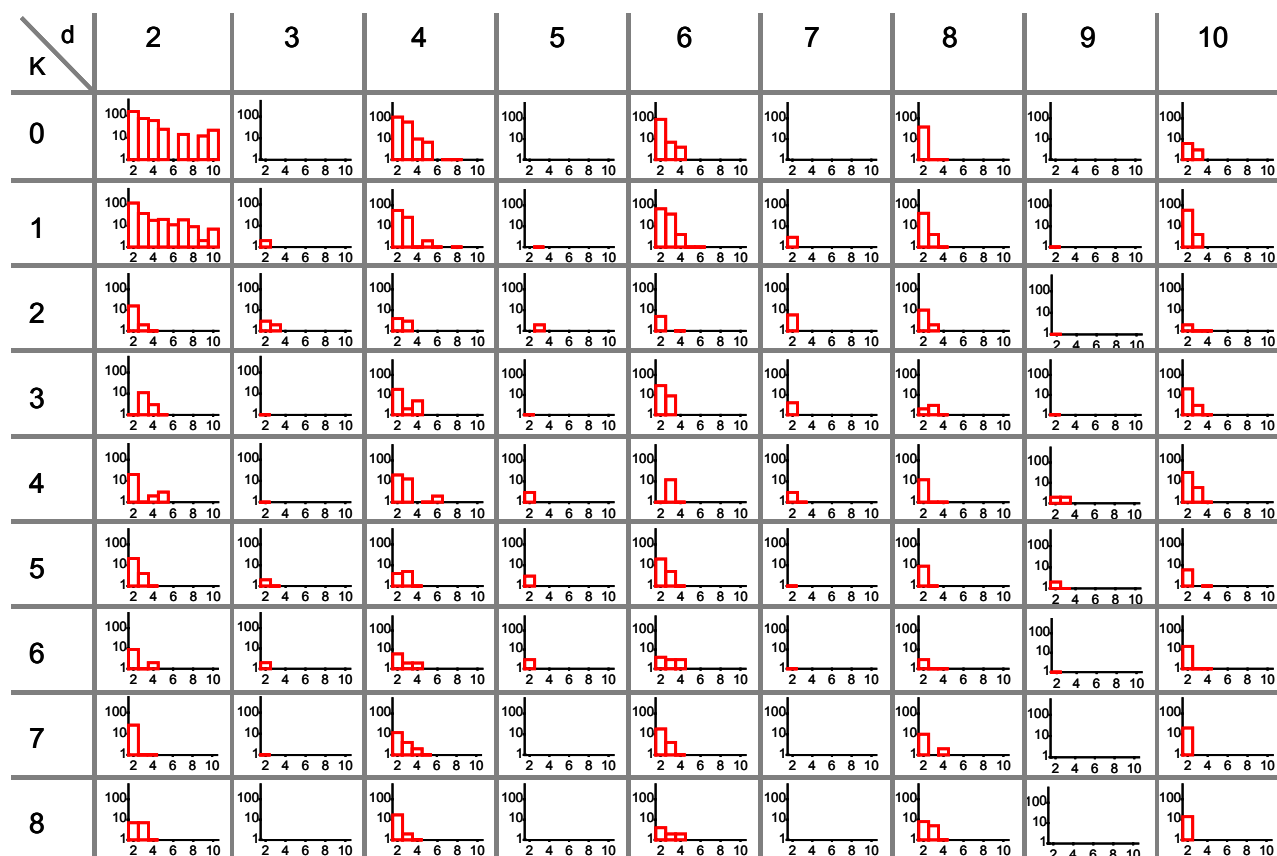


Abb. 4.48 Syn_3-Differenz zum Messschrieb

nur die Rainflow-Matrizen verglichen werden oder lediglich die rechnerischen Schadenssummen. In Abbildungen 4.46 bis 4.48 werden die Unterschiede anhand der Clustermatrizen analog Abb. 4.19 gezeigt. Man berücksichtige dabei die logarithmische Ordinatenskalierung in den Diagrammen. Wegen der logarithmischen Teilung der Ordinaten sind außerdem die Differenzen nur betragsmäßig dargestellt. Die wichtigsten Bereiche der Clustermatrizen des Messschriebs und der synthetischen Beanspruchungszeitreihen sowie ihre Abweichungen sind in den Anlagen 4.10 bis 4.16 in Tabellenform dargestellt. Eine Lebensdauerberechnung ausgehend von einer Clustermatrix ist nicht ohne Weiteres möglich, da hier keine Hysteresen gezählt werden. Jedoch könnte eine Modifikation des Rainflow-Algorithmus dahingehend, dass ähnlich wie in einer Clustermatrix zusammenhängende Hysteresen bzw. deren Auftretensmuster erfasst werden, zu einer Verbesserung rechnerischer Lebensdauerergebnisse führen. Hierbei könnte auf Grundlage des größeren Informationsgehalts der Matrix eine detailliertere Schädigungsbewertung der Hysteresen als wie bisher vorgenommen werden.

5 Experimentelle Lebensdauerermittlung

5.1 Allgemeines

Zur experimentellen Lebensdauerbestimmung werden die am kritischen Ort eines Bauwerks (meist in Form von Dehnungen) gemessenen Beanspruchungen auf eine geeignete Probe übertragen, mit der dann das Ermüdungsverhalten des Bauwerksdetails simuliert wird. Aufgrund der langen Lebensdauer realer Bauwerke sind diese zur Validierung der Methode nicht geeignet. Daher werden ersatzweise im Labor bauwerksähnliche Konstruktionen als Untersuchungsobjekte definiert, welche unter einer zeitgerafften pausenlosen Beanspruchung eine viel kürzere Lebensdauer aufweisen als reale Bauwerke und außerdem eine Variation der Untersuchungsparameter ermöglichen. In diesem Kapitel werden erste Untersuchungen mit Ersatzbauwerken vorgestellt. Es wird gezeigt, wie die Lebensdauern von Ersatzbauwerken mit Hilfe der oben beschriebenen Methoden prognostiziert werden.

5.2 Versuchsaufbau

Für eine statistische Absicherung von Ergebnissen der Lebensdauerversuche sind möglichst viele Einzelwerte erforderlich. Daher wurde auf möglichst kurze Versuchszeiten großer Wert gelegt. Gleichzeitig sollten die Lastwechselzahlen im Bereich 10^6 und höher liegen, was annähernd realistischen Verhältnissen entspricht. Hohe Lastwechselzahlen führen naturgemäß zu unpraktisch langen Versuchszeiten. Um trotzdem eine möglichst große Anzahl von Einzelversuchsergebnissen zu erreichen, wurden die Versuchsaufbauten derartig konzipiert, dass immer mehrere Ersatzbauwerke bzw. Proben gleichzeitig getestet werden konnten. Um dieses zu gewährleisten, bot sich an, die Versuchskörper in Reihe anzuordnen. Die Gesamtversuchszeiten wurden auch dadurch verkürzt, dass ein Ersatzbauwerk mehrere Kerbdetails beinhaltet, die simultan geprüft werden. Bei solchen Versuchsanordnungen ist jedoch darauf zu achten, dass der Schaden an einem Versuchskörper die Beanspruchung der anderen Versuchskörper nicht beeinträchtigt. Es wurde für die aus Walzträgern mit implementierten Kerbdetails bestehenden Ersatzbauwerke, die in Abb. 5.1 dargestellte Lösung gewählt. Die Ersatzbauwerke sind in der Abbildung als Scheiben idealisiert dargestellt. Der Prüfstand ist in Abb. 5.11 abgebildet. Zwängungen aus einer Verformungsbehinderung werden vermieden, indem das Horizontallager zur Kippbehinderung in die Symmetrielinie des Systems gelegt wurde. Dort tritt bei einer vertikalen Belastung keine Horizontalverschiebung und folglich auch keine Zwängung auf. Eine der Kopplungen zwischen den beiden Prüfkörpern wurde horizontal verschieblich ausgebildet, um eventuelle Umlagerungen aus Steifigkeitsunterschieden zwischen den beiden Trägern, insbesondere Steifigkeitsverlust infolge von Ermüdungsschäden, zu verhindern.

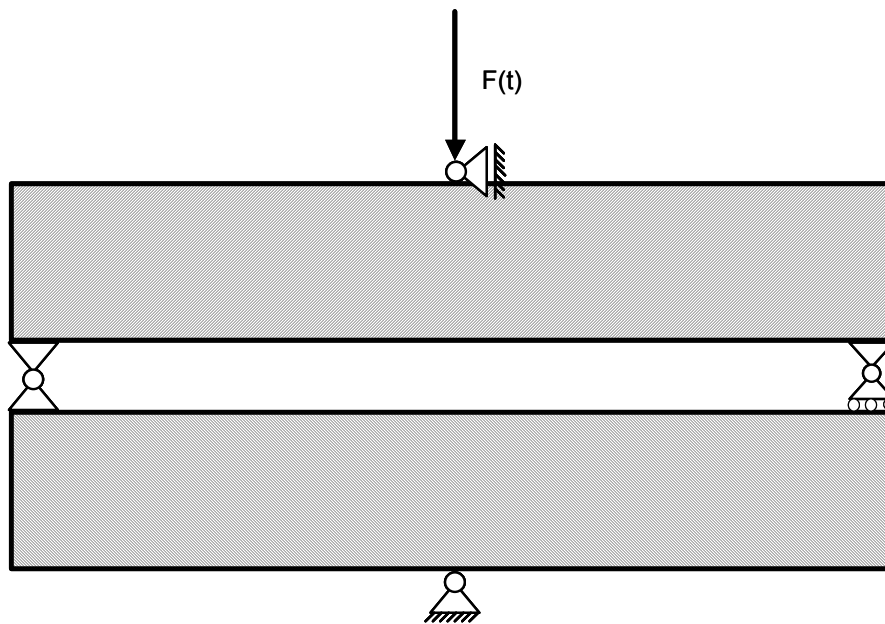


Abb. 5.1 System des Versuchsaufbaus zur Belastung von zwei Ersatzbauwerken

Bei axial belasteten Proben wurde das Konzept der gleichzeitigen Prüfung mehrerer Testkörper durch die Bildung einer Kette aus Proben oder durch spezielle Probeformen mit einer punktsymmetrischen Anordnung der Kerbdetails (sog. Doppelproben) realisiert (vgl. Abb. 5.12).

5.3 Schadensdefinition und Schadenserfassung

Die Kerbdetails der Ersatzbauwerke wurden zunächst bis zum technischen Anriss (ca. 1 mm) untersucht. In Anbetracht zukünftiger Untersuchungen des Gesamttragverhaltens und der damit zusammenhängenden möglichen Verlagerung von Schwachstellen infolge risswachstumsbedingten Beanspruchungsumlagerungen wurde nach erfolgtem Anriss der Versuch für Risswachstumsmessungen an entsprechenden Details fortgesetzt (Anlagen 5.1 bis 5.3). Die Beobachtung des Risswachstums gab zudem Aufschluss über maximale Risslängen, die das untersuchte System noch "sicher" ertragen kann. Dieses Kriterium ist für die Prognosen der Versagenslastspielzahl der Gesamtkonstruktion von Interesse.

Der Schaden an einem Kerbdetail muss automatisch im laufenden Versuch erfasst werden. Der Versuchsstand kann während $2/3$ der Gesamtversuchszeit nicht inspiziert werden und während der eigentlichen Arbeitszeit allenfalls gelegentlich. Die Erfassung des Anrisses im laufenden Versuch erfolgt mit Hilfe von $0,06\text{ mm}$ starken beschichteten Kupferdrähten, welche wie DMS im Bereich der kritischen Stelle appliziert werden (Abb. 5.2). Beim Anriss der kritischen Stelle reißen auch die Drähte und können so als Schalter benutzt werden. Die Kupferdrähte sind eine viel kostengünstigere Alternative zu den han-

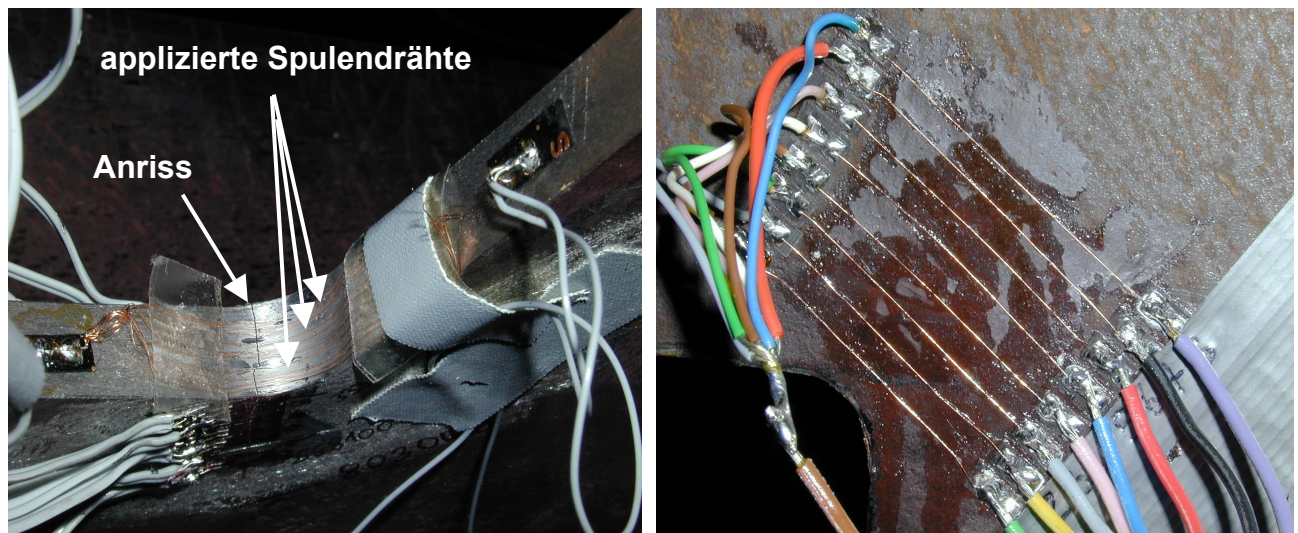


Abb. 5.2 Beschichtete Kupferdrahtleiter. Links als Anrissdetektor, rechts zur Risswachstumsmessung

delsüblichen Rissdetektoren. In definierten Abständen, senkrecht zum Rissverlauf appliziert, können die Kupferdrähte ebenfalls sehr kostengünstig und vor allem großflächig und flexibel zur Risswachstumsbeobachtung eingesetzt werden.

Um den Vorteil von mehreren in einem Ersatzbauwerk untergebrachten Kerbdetails effektiv nutzen zu können, muss der Schaden an einem Kerbdetail im laufenden Versuch automatisch erfasst und dokumentiert werden. Schaltet man nämlich die Prüfmaschine derart, dass sie infolge eines Anrisses automatisch stoppt, kommt es häufig zu unnötigen Wartezeiten bis zur Fortsetzung des Versuchs zur Untersuchung der restlichen Kerbdetails. Daher wurde zur Schadensregistrierung ein Zählwerk für die Lastspielzahl mit automatischer Anrisserfassung konzipiert, welche die Überwachung von insgesamt 64 Schaltern übernimmt. Jedes Rissereignis (Schalter j offen bei Lastwechselzahl N_j , mit $j=1\dots 64$) wird dabei sofort mittels PC dokumentiert. Mit Hilfe dieses Gerätes ist es möglich, den Versuch unabhängig von diversen Anrissen weiterzufahren, wodurch erhebliche Versuchszeiten eingespart werden können.

5.4 Untersuchte Beanspruchungsformen

Folgende Beanspruchungsverhältnisse wurden untersucht:

- Low Cycle Fatigue (LCF): Einstufig mit kraftgeregeltem Dreiecksverlauf mit einer Rate von 110 kN/s. Das entspricht einer mittleren Dehngeschwindigkeit von ca. 0,8 %/s an der kritischen Stelle.

- High Cycle Fatigue (HCF): Einstufig mit kraftgeregeltem Sinusverlauf auf mehreren Beanspruchungsniveaus. Die Belastungsfrequenz betrug dabei zwischen 3 und 5 Hz.
- HCF-Random: Sich zyklisch wiederholende 16-stufige Betriebsbeanspruchung entsprechend einer Wochenmessung an der Autobahnbrücke BS-Wenden auf zwei verschiedenen Beanspruchungsniveaus. Das Kollektiv und die Rainflow-Matrix der Betriebsbeanspruchung können den Anlagen 5.4 und 5.5 entnommen werden. Die Belastungsrate wurde so gewählt, dass die Sollwerte optimal angefahren werden konnten. Je nach System und Belastung ergaben sich Belastungsraten zwischen 400 und 600 kN/s .

5.5 Werkstoff

Die Untersuchungen wurden an Proben und Ersatzbauwerken aus handelsüblichem Baustahl S355 J2 G3 gemäß DIN EN 10 025 (veraltete Bezeichnung gemäß DIN 17 100: St 52-3 N) Lieferzustand "normalisierend gewalzt" durchgeführt. Der Stahl entstammte dem Werk der Salzgitter AG. Die gesamte für die Untersuchungen erforderliche Stahlmenge konnte nicht aus einer einzigen Charge bezogen werden. Den Versuchen lagen insgesamt fünf verschiedene Chargen zugrunde, die allerdings sehr ähnliche mechanische und chemische Kennwerte aufwiesen. Die mechanischen Kennwerte wurden zusätzlich zu den Angaben der mitgelieferten Prüfbescheinigungen (3.1b-Zeugnisse gemäß DIN EN 10024) durch eigene Zugversuche nach DIN EN 10002-1 bestimmt. Der Anteil einiger chemischer Elemente wurde zudem mittels einer Stückanalyse mit dem Verfahren EDX (Energy Dispersive X-Ray-Analysis) überprüft (vgl. Anlagen 5.6 und 5.7). In Abb. 5.3 sind die aus je drei Zugversuchen gemittelten Arbeitslinien zu den einzelnen Chargen dargestellt. Die Chargen sind mit römischen Ziffern gekennzeichnet. Die Arbeitslinien zu allen Einzelversuchen sind in Anlage 5.8 zusammen in einem Diagramm dargestellt. Dadurch ist ein Überblick über die relativ geringe Streuung der Festigkeiten der verwendeten Werkstoffe gegeben.

Trotz der Ähnlichkeit der Werkstoffkennwerte der Chargen wurde darauf geachtet, dass die Ersatzbauwerke und die zugehörigen Proben vorwiegend aus Materialien gleicher Charge hergestellt wurden, da zunächst sämtliche kontrollierbare Einflussparameter weitgehend konstant gehalten werden sollten.

Die Gewährleistung, dass Bauwerk und Proben einer Charge entstammen, wird bei der Untersuchung von realen Bauwerken nicht immer gegeben sein, da ein Bauwerk meist

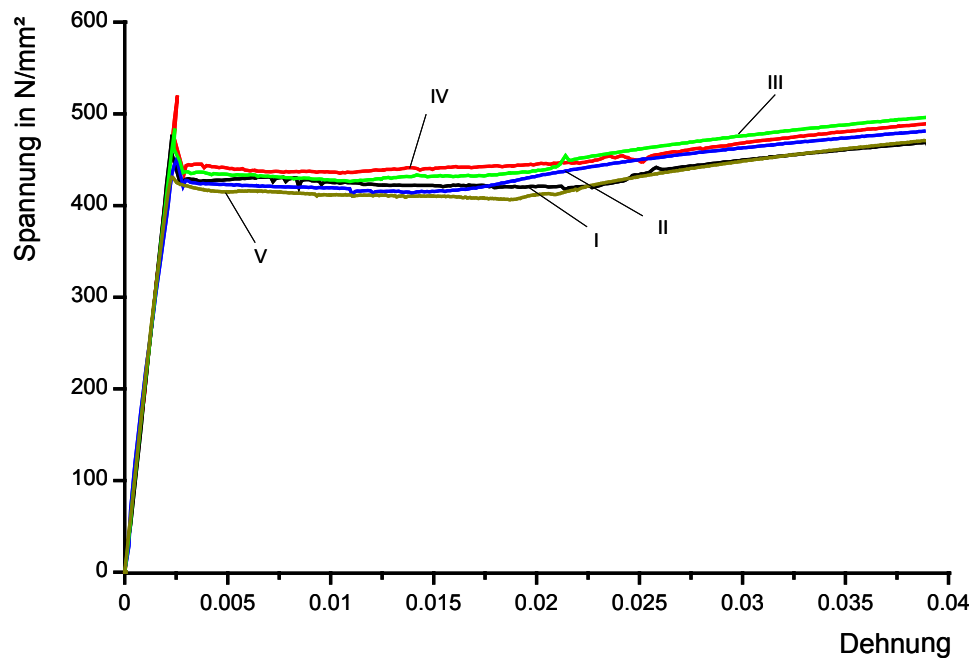


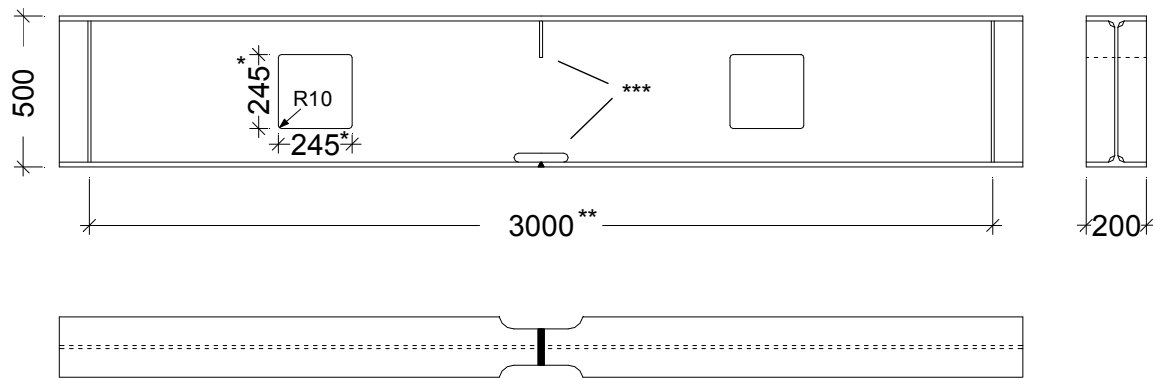
Abb. 5.3 Arbeitslinien untersuchter Werkstoffe aus Chargen I bis V

wegen seiner großen Abmessungen zwangsläufig aus Materialien verschiedener Chargen hergestellt wird. Bei bestehenden alten Bauwerken werden Reste der verwendeten Chargen in der Regel nicht verfügbar sein. Erforderliche Untersuchungen hierzu werden in Abs. 6.2 "Ausblick" angesprochen.

5.6 Versuchskörper

5.6.1 Ersatzbauwerk

Insgesamt wurden bisher zwei Typen von Ersatzbauwerken untersucht. Typ I ist ein einfaches Modell mit zwei identischen kritischen Details, nämlich quadratische Aussparungen im Steg eines IPE 500-Profils. Das Ersatzbauwerk Typ II ist eine Weiterentwicklung des Typs I. Es wurde mit insgesamt drei unterschiedlichen Kerbdetails entworfen, welche im Test simultan beansprucht werden. Bei den Kerbdetails handelt es sich um in der Praxis übliche Konstruktionskerben: Aussparungen, Anschlüsse von Lasteinleitungssteifen sowie Stoßausführungen mittels Schweißverbindungen (Abb. 5.4). Detaillierte Abmessungen des Ersatzbauwerks Typ II können Anlage 5.9 entnommen werden. Die Kerbdetails des Ersatzbauwerks (Steifenanschluss, Stumpfnah und Aussparungen) wurden derart entworfen, dass der Anriss eines Details keinen nachweisbaren Einfluss auf die Beanspruchung eines anderen Details hat. Mit Hilfe von Lebensdauerschätzungen mittels der linearen Schadensakkumulation wurden die Kerbdetails so ausgelegt, dass mit Ausnahme der Untergurtnaht bei den übrigen Kerbdetails in etwa die gleiche Lebensdauer zu erwarten war. Lagen die Anrisslebensdauern der Details aufgrund der natürlichen Streuung zu weit aus-



* in Ersatzbauwerk I : 300 mm

** in Ersatzbauwerk I : 2500 mm

*** in Ersatzbauwerk I nicht vorhanden

Abb. 5.4 Ersatzbauwerk II

einander, erfolgte eine Instandsetzung der zuerst angerissenen Stelle. Die angewandten Reparaturmaßnahmen sind in Anlage 5.10 und 5.11 beschrieben.

Jedes Ersatzbauwerk wurde vor dem Einsatz exakt vermessen. Die Einzelabmessungen können den Tabellen der Anlagen 5.12 und 5.13 entnommen werden. Abb. 5.5 zeigt beispielsweise die Verteilung von Stegdicken im Wahrscheinlichkeitsnetz. Die Stegdicken wurden an der kritischen Aussparungsecke gemessen. Sie sind annähernd normalverteilt und zeigen eine relativ geringe Streuung. Es wurde eine Überwälzung von 0,22 mm gegenüber dem Nennmaß festgestellt. Da jedoch die tatsächliche Beanspruchung am kritischen Ort gemessen wird, spielt die Maßabweichung hier nur eine untergeordnete Rolle.

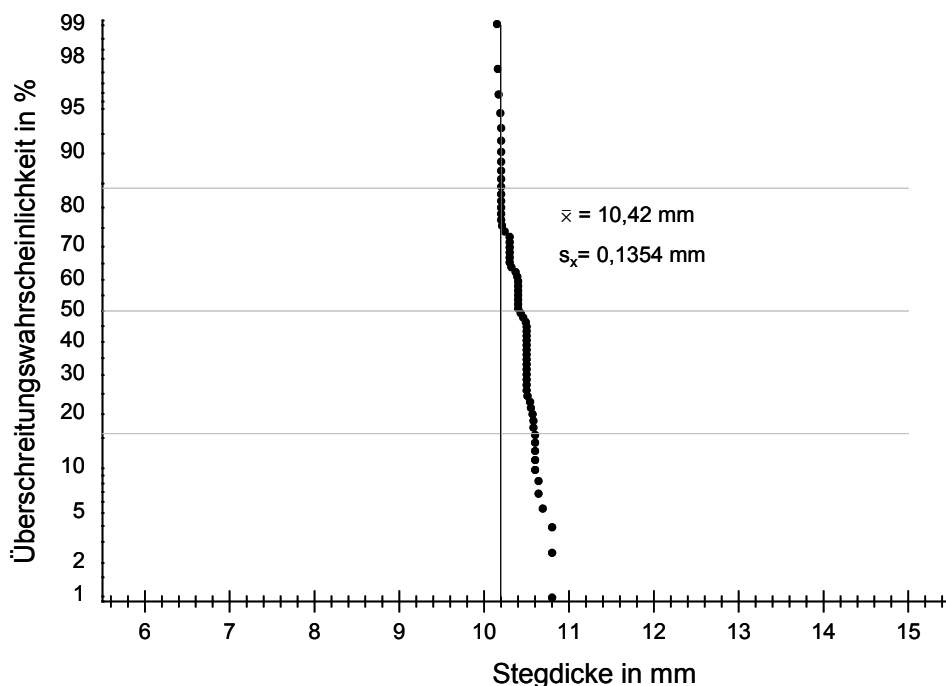


Abb. 5.5 Verteilung der Stegdicke am kritischen Ort. Nenndicke nach DIN 1025 Teil 1(10.63): $s = 10,2 \text{ mm}$

5.6.1.1 Aussparungsecken

Die quadratischen Aussparungen im Steg wurden mechanisch gefräst. Die Ecken des Quadrats wurden dabei mit einem Radius von 10 mm ausgerundet. Nach dem Fräsvorgang wurden die Ausrundungsbereiche durch ein rotierendes Poliergummi mit identischem Radius bearbeitet. Bei allen Versuchskörpern wurde dasselbe Herstellungsverfahren angewandt.

5.6.1.2 Schweißverbindung im Untergurt

Im Untergurt wurde eine manuell gefertigte 4-Lagen MAG-V-Schweißverbindung mit plan-geschliffener Wurzelseite vorgesehen. Zur Nahtvorbereitung wurde ein V-Ausschnitt im Untergurt autogen brenngeschnitten. Um eine optimale Durchschweißung der Nahtwurzel zu erreichen, wurde im Bereich der Naht auf einer Länge von ca. 200 mm der Übergang vom Flansch zum Steg (Ausrundungsbereich) mechanisch durch Fräsen entfernt (vgl. Detail A: Nahtvorbereitung in Anlage 5.9). Diese Schweißverbindung war ebenfalls das Untersuchungsobjekt des Teilprojekts B4 des SFB 477, weshalb die Wurzelseiten der Nähte nach dem Schweißen plan geschliffen wurden.

5.6.1.3 Steifenanschlüsse

Die Steifen wurden mittels einer MAG-Schweißung angeschlossen. Aufgrund der geringen Blechdicke von 5 mm konnte sowohl das Steifenblech als auch die Anschlussnaht am Flansch Ausgang für einen Ermüdungsschaden sein.

5.6.2 Proben der kritischen Details

5.6.2.1 Aussparungsecken

Zur Findung einer Probenform für die Aussparungsecken, sodass das gleiche Dehnungsfeld erhalten wird, sind Parameterstudien mit FE-Modellen erforderlich. Hierzu wird in einem Blechstreifen ein V-förmiger Einschnitt (Öffnungswinkel: 90° und Ausrundungsradius: 10 mm wie beim Ersatzbauwerk) in Tiefe und Winkel variiert. Der Blechstreifen weist dabei die gleiche Dicke wie der Steg des Ersatzbauwerks auf und wird axial belastet (Abb. 5.6 unten). Die Parameter "Einschnittstiefe" und "Winkel" werden so bestimmt, dass die örtlichen Beanspruchungen in der Umgebung des Anrisses für die Probe und das Ersatzbauwerk identisch sind (vgl. Abb. 5.6, jeweils rechts). Durch die identische Vernetzung der Kerbbereiche in den FE-Modellen des Ersatzbauwerks und der Probe ist es möglich, bei der Parameterstudie zur Bestimmung der Geometrie der Probe das Dehnungsfeld entlang von Pfaden im FE-Netz zu vergleichen (Abb. 5.8). Die Beanspruchungen werden unter Berücksichtigung eines bilinear elastisch-plastischen Materialverhaltens ermittelt.

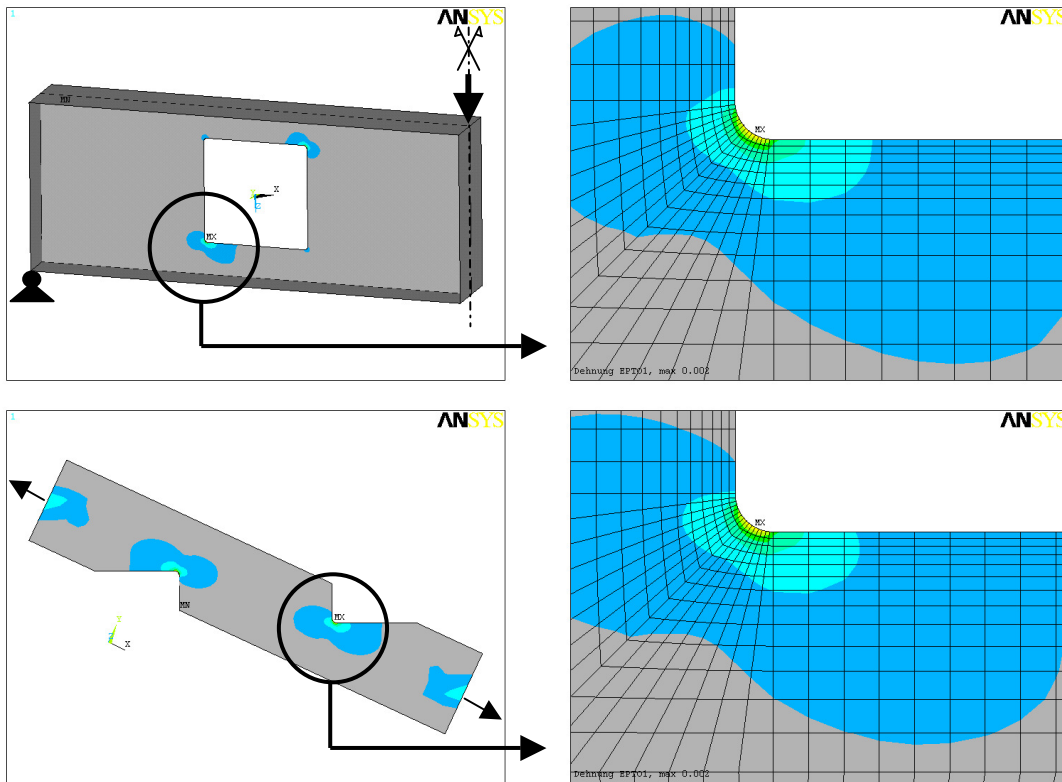
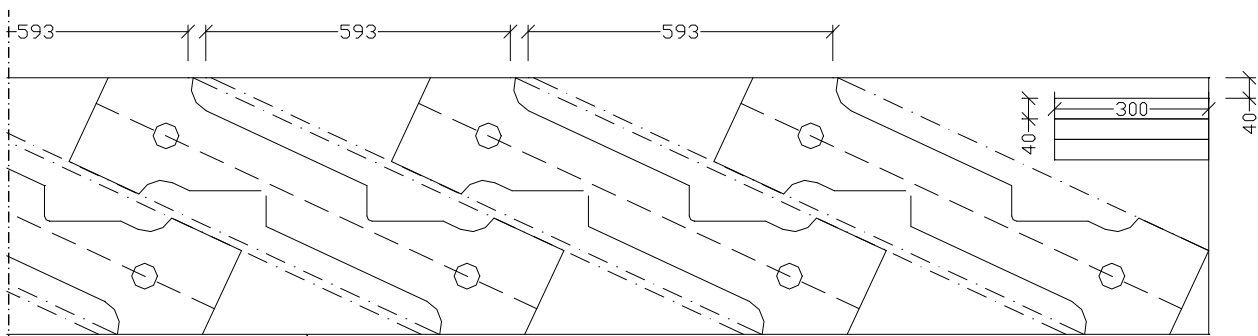


Abb. 5.6 Vergleich der Spannungskonzentrationen im Kerbgrund;
oben: Ersatzbauwerk, unten: Probe

Nach der Bestimmung der Probenform wurden diese aus demselben Material wie die Ersatzbauwerke gefertigt. Um systematische Abweichungen weitgehend zu minimieren, wurden die Proben aus dem Steg des IPE 500-Profiles so herausgeschnitten, dass sogar der Verlauf der Walzrichtung bezüglich der Kerbe beachtet wurde (vgl. Schneideplan in Abb. 5.7).

Um die Gesamtversuchszeiten gering zu halten, beinhaltet die Probe zwei Kerben. Nach dem Anriss einer Stelle wurde die "Doppelprobe" gegen eine neue ausgetauscht und ein neuer Versuch gestartet. Die angerissene Stelle wurde dann für die spätere Fortsetzung



Steg des IPE 500 ab Beginn des Ausrundungsradius getrennt

Abb. 5.7 Auszug aus dem Schneideplan der Proben zu den Aussparungsecken

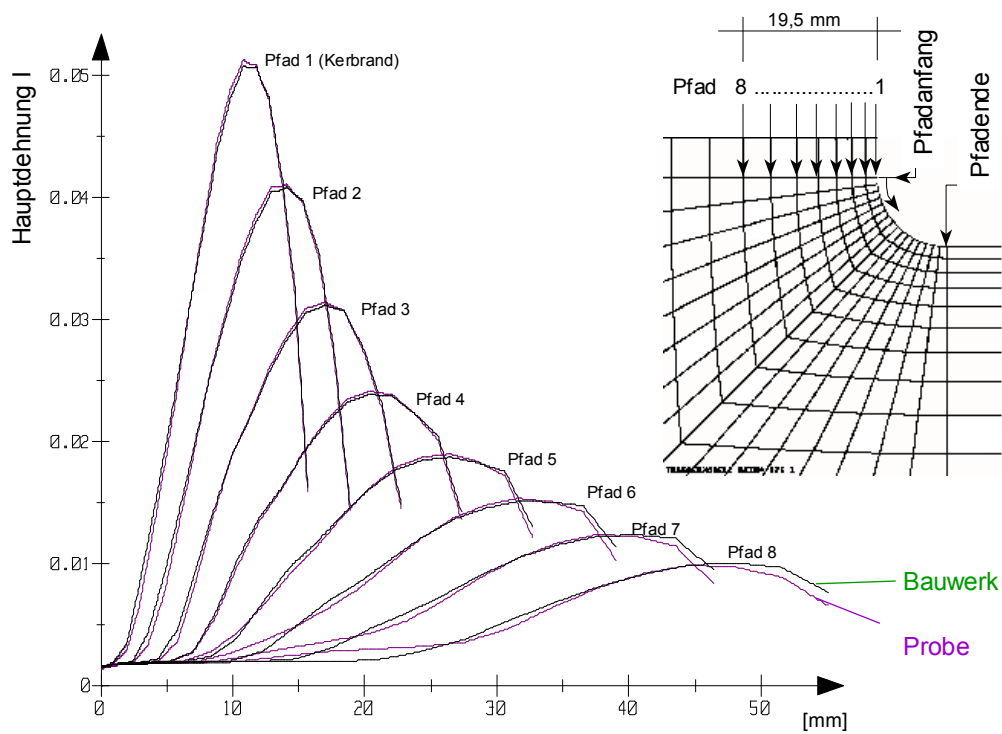


Abb. 5.8 Vergleich der Hauptdehnungen am Ersatzbauwerk und an der Probe

des Versuchs repariert, damit der Anriss die Beanspruchung der anderen Kerbe nicht beeinträchtigt. In Anlagen 5.14 bis 5.16 sind ebenfalls andere in den verschiedenen Versuchsreihen eingesetzten Probeformen abgebildet.

5.6.2.2 Schweißverbindung im Untergurt

Es wurden zwei Bleche mit gleicher Schweißnahtvorbereitung wie die des Ersatzbauwerks stumpf miteinander verschweißt. Sowohl die Prüfnah des Ersatzbauwerks als auch die

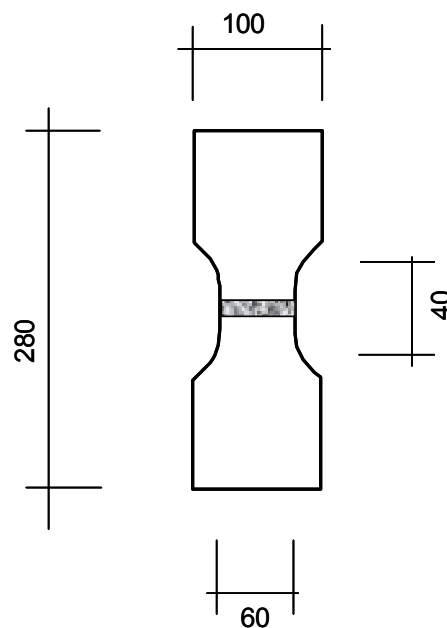


Abb. 5.9 Proben für die Schweißverbindung des Untergurts; Maße in mm

der Kleinprobe wurden mit gleichen Grund- und Zusatzwerkstoffen sowie gleichen Schweißparametern von demselben Schweißer ausgeführt. Es wurde außerdem auf möglichst gleiche Einspann- und Abkühlbedingungen geachtet. Abb. 5.9 zeigt die Proben zu den Stumpfnähten (s.a. Abb. 5.17 rechts). Die Proben wurden aus Flanschen gefertigt, die bei der Herstellung der Proben für die Aussparungsecken gemäß dem Schneideplan nach Abb. 5.7 anfielen.

Eigenspannungsverhältnisse infolge der Schrumpfbehinderung der Naht des Ersatzbauwerks wurden durch eine Versuchstechnik berücksichtigt, auf die in Abs. 5.7.3 eingegangen wird.

5.6.2.3 Steifenanschlüsse

Das lokale Beanspruchungsbild der auf beiden Stegseiten angeordneten Steifen ist sehr komplex. Jede Steife wird mittels Doppelkehlnähten am Oberflansch und am Steg des Trägers angeschlossen. Da entsprechend der Schweißfolge eine der Nähte (i.d.R. die am Steg) das Steifenblech beim Schweißen bereits starr mit dem Träger verbindet, treten infolge Schrumpfbehinderungen sowohl im Steifenblech als auch in den Nähten Eigenspannungen unbestimmter Größe und Richtung auf. Beim Probenentwurf sollte daher ein ähnlicher Herstellungsvorgang angewandt werden, um diese Eigenspannungsverhältnisse in etwa zu reproduzieren.

Die Kolbenbelastung wird durch eine über die Steifen angeordnete Welle jeweils als Linienlast in den Träger geleitet (vgl. Abb. 5.10). Bei jedem Träger ist mit Walztoleranzen zu rechnen. Weist ein Walzquerschnitt keine exakt parallelen Flansche auf, bewirkt diese Imperfektion eine ungleiche Verteilung der Belastung auf die beiden Steifen. Bei einigen Messungen konnten starke Unterschiede zwischen den Beanspruchungen eines Steifenpaares beobachtet werden. Hierzu wurden die Hauptdehnungen im Nahtbereich mit Hilfe von beidseitig jeder Steife applizierten DMS-Rosetten bestimmt. Schließlich werden die Beanspruchungsverhältnisse durch den Bruch einer Steife zunehmend undurchsichtig, da sich damit naturgemäß auch die Beanspruchung der gegenüberliegenden Steife ändert. In diesem Fall beteiligt sich dann außerdem der Trägerflansch durch örtliche Biegung an der Lastabtragung. In Abb. 5.18 rechts ist der Zustand nach dem ersten Anriss schematisch skizziert.

Eine Simulation der örtlichen Beanspruchungsverhältnisse einer Steiffennaht durch eine axial belastete Probe, deren Struktur dann wiederum ähnlich wie bei den Stegaussparungen durch FE-Untersuchungen zu bestimmen wäre, reicht nicht aus. Dies wird später u.a. bei Betrachtung der möglichen Versagensbilder dieses Kerbdetails deutlich. Zur Erfassung des komplexen Tragverhaltens empfiehlt es sich daher, den Steifenanschluss als eine

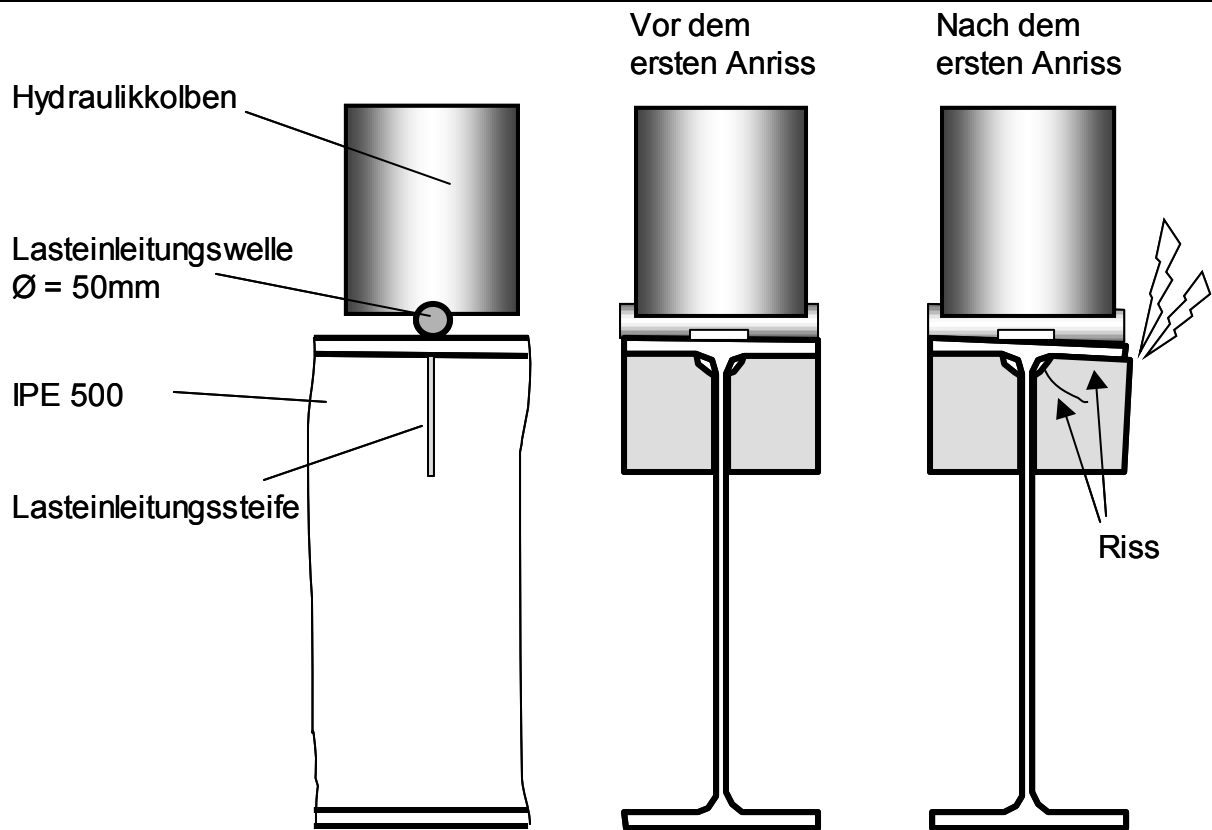


Abb. 5.10 Lasteinleitung und Verlagerung der Beanspruchung der Steifen vor und nach dem ersten Anriss

Einheit zu betrachten und den gesamten Anschlussbereich, d.h. beide Steifen, den Steg und den Oberflansch, 1:1 als Probe nachzubilden.

5.7 Versuchsdurchführung

5.7.1 Versuchsreihenbezeichnung

Nach Art der Belastung und Typ des Ersatzbauwerks (I oder II) werden bisher 6 Versuchsreihen unterschieden, welche wie folgt bezeichnet werden:

1. "LCF I": Einstufig mit $F_u = -550\text{ kN}$, $F_o = 0\text{ kN}$
2. "Wöhler I": Einstufig mit $F_u = -105\text{ kN}$, $F_o = -5\text{ kN}$
3. "Random I": Random 16-stufig mit $F_{\min} = -300\text{ kN}$, $F_{\max} = -15\text{ kN}$
4. "Wöhler IIa": Einstufig mit $F_u = -260\text{ kN}$, $F_o = -10\text{ kN}$
5. "Wöhler IIb": Einstufig mit $F_u = -300\text{ kN}$, $F_o = -10\text{ kN}$
6. "Random II": Random 16-stufig mit $F_{\min} = -500\text{ kN}$, $F_{\max} = -15\text{ kN}$



Abb. 5.11 Versuchsaufbau für Ersatzbauwerke des Typs I mit Detailvergrößerung

5.7.2 Aussparungsecken

Abb. 5.11 zeigt einen Versuchsaufbau mit zwei Ersatzbauwerken und die Detailvergrößerung einer Aussparungsecke. Mit Hilfe von beidseitig am Steg applizierten Dehnungsmessstreifen (verschaltet als 2/4-Brücken vgl. [HOFF 87]) werden die Hauptdehnungen im Bereich des Kerbgrunds erfasst, die dann auf adäquate Proben übertragen werden. Es ist unerlässlich, dass sich die am Ersatzbauwerk und an der Probe applizierten DMS bezüglich der Kerbe exakt an derselben Position befinden. Dieses wurde durch die Herstellung von speziellen Schablonen gewährleistet, mit deren Hilfe eine sehr hohe Reproduzierbarkeit bei der Applikation erreicht wurde. Zur Aufnahme der Dehnungsgradienten wurden wegen der größeren Zuverlässigkeit unter zyklischer Beanspruchung einzeln applizierte DMS den üblichen DMS-Ketten vorgezogen. Die Versuchsanordnung der Proben und das Detail der Kerbe sind in Abb. 5.12 dargestellt.



Abb. 5.12 Links: zwei Doppelproben in Reihe; Mitte: eine Doppelprobe; Rechts: Detailvergrößerung

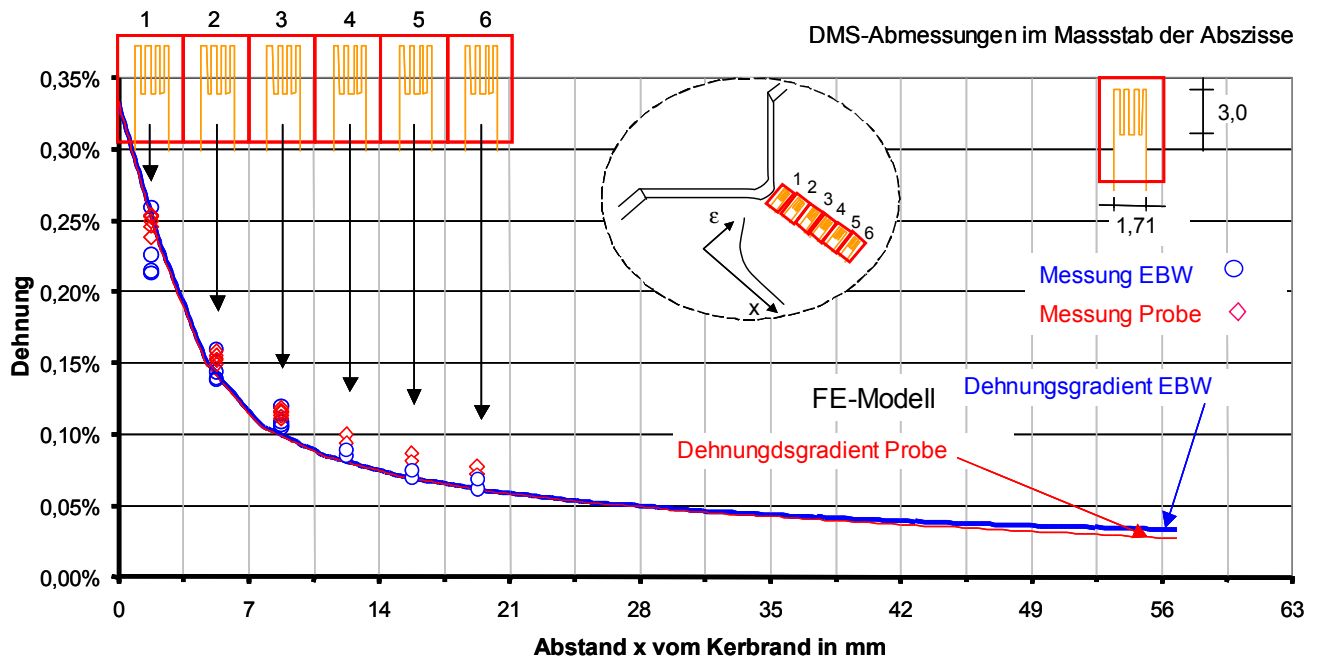


Abb. 5.13 Dehnungsmessung am Kerbrand der Probe bzw. Ersatzbauwerk

Die Ersatzbauwerke sowie die Proben werden kraftgesteuert beansprucht. Für die Proben ist eine äquivalente (axiale) Prüfkraft erforderlich, mit der dieselbe Kerbgrundbeanspruchung wie für das Ersatzbauwerk simuliert werden kann. Zur Bestimmung dieser Prüfkraft werden die am Ersatzbauwerk gemessenen Dehnungen des ersten Lastwechsels herangezogen. Messergebnisse von verschiedenen Trägern und Proben sind für die Versuchsreihe "Wöhler II/a" in Abb. 5.13 dargestellt. Die bei dieser Versuchsreihe festgestellte starke Streuung der Signale der unmittelbar am Kerbrand applizierten DMS lässt sich teilweise anhand der Kurvenschar in Anlage 5.8 erklären. Demnach liegt der Dehnungsbetrag von 0,25 %, bei der die Messergebnisse starke Streuungen zeigen, (zufällig) exakt im Bereich der oberen Streckgrenze des Werkstoffs. Die obere Streckgrenze ist nicht bei allen Versuchskörpern ausgeprägt vorhanden bzw. sie streut. Dazu tragen die unterschiedlichen Stegdicken zu den Streuungen der Signale bei (vgl. Abb. 5.5).

Werden DMS in plastisch beanspruchten Bereichen appliziert, sind Streuungen der Messwerte grundsätzlich nicht vermeidbar. DMS liefern nämlich nur eine örtlich begrenzte Information über das tatsächliche Dehnungsfeld, dessen Gradient im Gegensatz zum theoretisch ermittelten Gradienten (vgl. Abb. 5.13) in Richtung Kerbgrund nicht monoton steigt. Gründe hierfür sind u.a. Lüdersbänder und lokale Mikrostörungen an der Oberfläche. Daher wird der Gradient anhand einer Ausgleichskurve geschätzt, die durch die diskret gemessenen Dehnungswerte gelegt wird. Eine weitere Streuungsursache sind die Toleranzen der geometrischen Abmessungen der an der Beanspruchung beteiligten Tragwerkelemente. Bei einem Vergleich mit dem Ersatzbauwerk fällt auf, dass die Streuung der Messwerte der Proben bei einer konstanten Kraft geringer ausfällt. Im Unterschied zum

Träger ist die Beanspruchung der Messstelle allein von der Blechdicke der Probe abhängig. Darüber hinaus ist das Lastabtragsverhalten bei der Probe eindeutig, Lastumlagerungen wie beim Ersatzbauwerk treten nicht auf.

Die Streuungen der Oberdehnungen sind jedoch nicht ausschlaggebend, da sich die $\Delta\varepsilon$ -Werte wegen des i.d.R. vorwiegend linear verlaufenden Entlastungspfades beinahe konstant verhalten. Bei Hysteresen gleicher Gestalt und Mittelspannung kann eine übereinstimmende Schädigung erwartet werden. Abb. 5.14a macht diesen Zusammenhang anhand sehr unterschiedlicher Bauteilfließkurven deutlich. Bei gleichem zyklischen Materialverhalten lassen sich die beiden Hysteresen auch im stabilisierten Zustand fast als gleichwertig betrachten. Wie unter anderem die Definitionen vieler Schädigungsparameter des Kerbgrundkonzepts zeigen, sind für die Ermüdung in erster Linie die Oberspannung σ_o und die Ausschlagsdehnung ε_a bzw. $\Delta\varepsilon = 2 \cdot \varepsilon_a$ relevant. Mit Gleichung (5.1) wird beispielsweise einer der gebräuchlichsten Schädigungsparameter zur Bewertung einer Hysterese

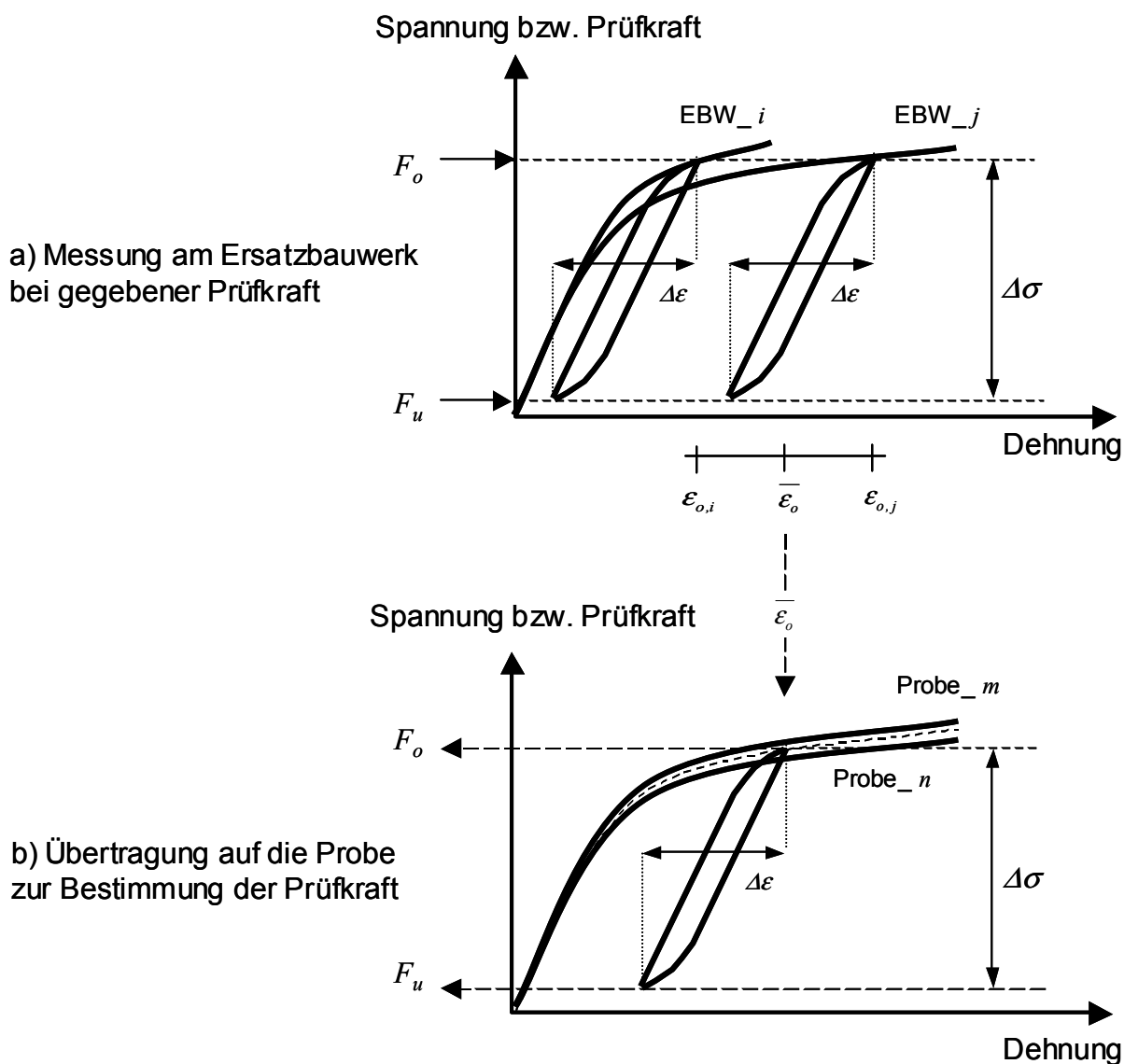


Abb. 5.14 Vorgehensweise zur Bestimmung der Prüfkraft für die Proben

P_{SWT} nach SMITH, WATSON und TOPPER angeführt [SMIT 70].

$$P_{SWT} = \sqrt{\sigma_o \cdot \varepsilon_a \cdot E} \quad (5.1)$$

Dementsprechend wurde für eine Versuchsreihe die Beanspruchung durch den Mittelwert aller gemessenen Oberdehnungen $\overline{\varepsilon_o}$ und $\Delta\varepsilon$ charakterisiert (vgl. Abb. 5.14 a, b).

Zur Bestimmung der Prüfkraft wurde der erste Lastwechsel der Proben dehnungsgeregelt gefahren. Auch hier führte die Vorgabe der mittleren Oberdehnung wegen der Streuung der "Probenfließkurven" zu unterschiedlichen Prüfkraften (vgl. Abb. 5.14b). Zur Bestimmung einer einheitlichen Prüfkraft für die Versuchsreihe wurde ebenfalls vom Mittelwert der ermittelten Prüfkraften ausgegangen.

Bei der geschilderten Vorgehensweise wirkt sich die starke Nichtlinearität der σ - ε -Beziehung in vielerlei Hinsicht günstig aus. Gemäß Abb. 5.14 haben die Streuungen der am Ersatzbauwerk gemessenen Oberdehnung keinen signifikanten Einfluss auf die für die Probe einzustellenden Prüfkraft (Oberspannung). Daher ist eine einfache Mittelwertbildung zur Wahl einer Oberdehnung hinreichend präzise. Bei der in ermüdungstechnischer Hinsicht viel bedeutenderen Oberspannung kann außerdem von einer deutlich geringeren Streuung ausgegangen werden als bei den Oberdehnungen. Die bei verschiedenen Proben unterschiedlich hohen Kräfte bei vorgegebener Oberdehnung streuten bei weitem nicht so wie die an den Ersatzbauwerken gemessenen Oberdehnungen. Wenn die Dehnung zur Bestimmung der äquivalenten Prüfkraft als Steuersignal verwendet wird, besteht noch ein entscheidender Vorteil darin, dass die für die Proben einzustellende Prüfkraft gegenüber Mess- und Applikationstoleranzen wenig empfindlich reagiert und sie sich außerdem fein justieren lässt. Neben dem Mittelwert der Oberdehnungen ist $\Delta\varepsilon$ die maßgebendere Beanspruchungsgröße, welche auf die Proben übertragen wird. Durch $\Delta\varepsilon$ wird das untere Kraftniveau für die Proben festgelegt.

Nach der dehnungsgeregelten Festlegung der oberen und unteren Prüfkraftgrenzen für die Proben läuft der Versuch kraftgeregelt weiter. Eine Dehnungsregelung im weiteren Versuchsverlauf ist hier nicht sinnvoll, da für hohe zyklische Beanspruchungen keine lange Lebensdauern der DMS zu erwarten sind. Wegen identischer Dehnungsgradienten bzw. Kerbschärfen kann bei gleichem Material und bei gleicher Beanspruchung für die Probe von einem gleichen zyklischen Materialverhalten und gleicher Anrisslebensdauer wie für das Ersatzbauwerk ausgegangen werden. Sofern die DMS durch die hohen zyklischen Dehnungen nicht beschädigt wurden, konnten während der Versuche die Kraft-Dehnungs-

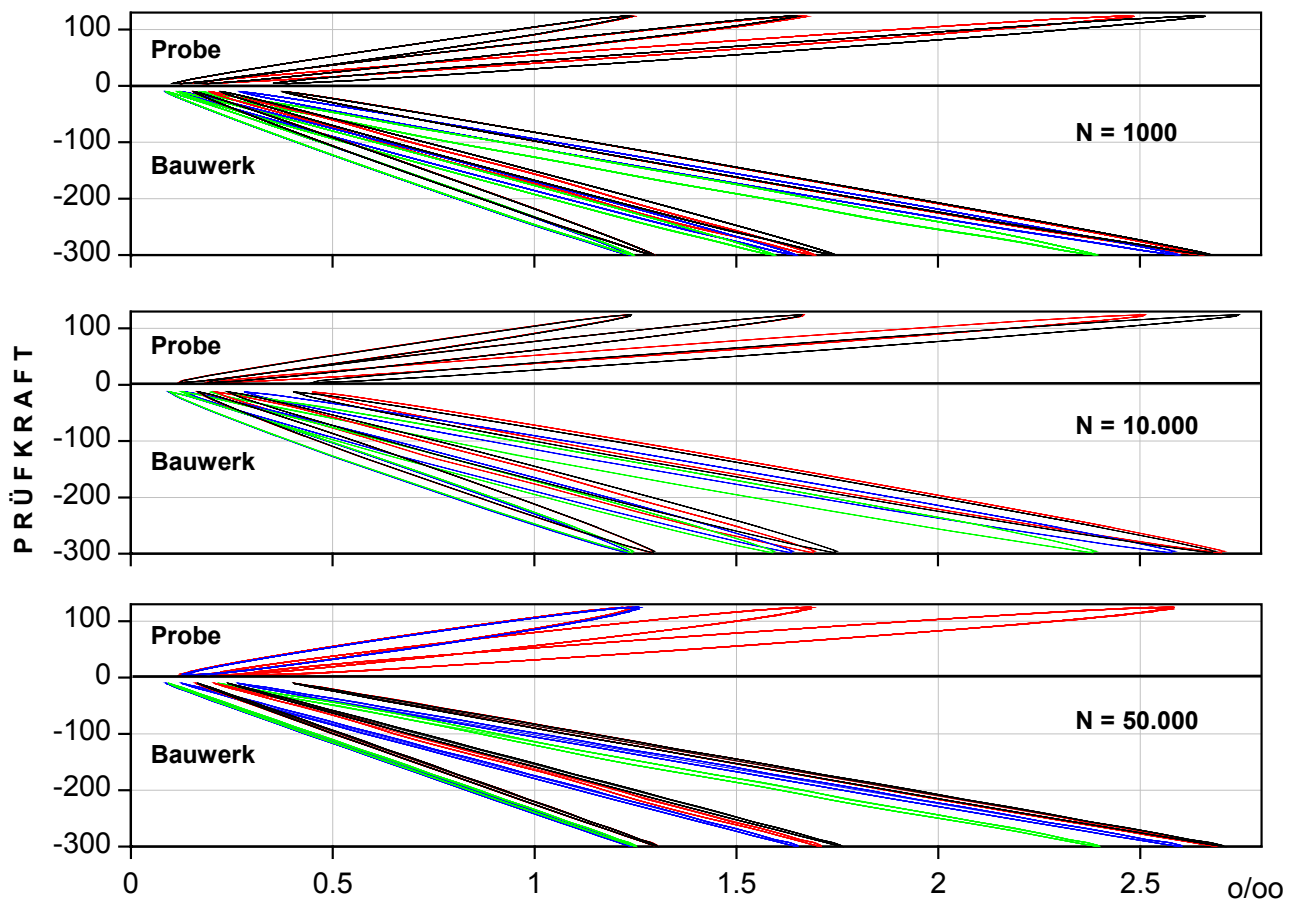


Abb. 5.15 Gegenüberstellung der Kraft- Dehnungs- Beziehung am Ersatzbauwerk und an der Probe während des Versuchs. Bei der Lastwechselzahl von 50.000 konnte das Signal einiger DMS wegen zyklischer Schädigung bereits nicht mehr verwertet und dargestellt werden.

Hysteresen am Ersatzbauwerk und an der Probe zu diskreten Lastwechselzahlen aufgezeichnet und zur Kontrolle miteinander verglichen werden. Beide Prüfkörper zeigten sich diesbezüglich sehr ähnlich (Abb. 5.15).

Dass in den Kerben des Ersatzbauwerks und der Probe nahezu identische Beanspruchungsverhältnisse vorliegen, wird u.a. dadurch bestätigt, dass die Risse in beiden Fällen durch die DMS laufen, sie also an den vorhergesagten Stellen auftreten. In Abb. 5.11 und 5.12 ist jeweils ein relativ kurzer Riss von ca. 25mm Länge erkennbar. Die Ähnlichkeit der beiden Kerbdetails nimmt natürlich mit wachsender Risslänge ab.

5.7.3 Schweißverbindung im Untergurt

Anders als bei den Aussparungsecken wurden bei diesem Kerbdetail die Dehnungen außerhalb der Kerbe gemessen und auf eine Laborprobe übertragen (Abb. 5.16). Das Untersuchungsdetail jeweils in den Prüfständen für das Ersatzbauwerk und für die Probe ist in Abb. 5.17 dargestellt. Die Versuche mit den Detailproben zu der Stumpfnahut wurden in Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt B4 des SFB 477 durchgeführt [WOHL 00].

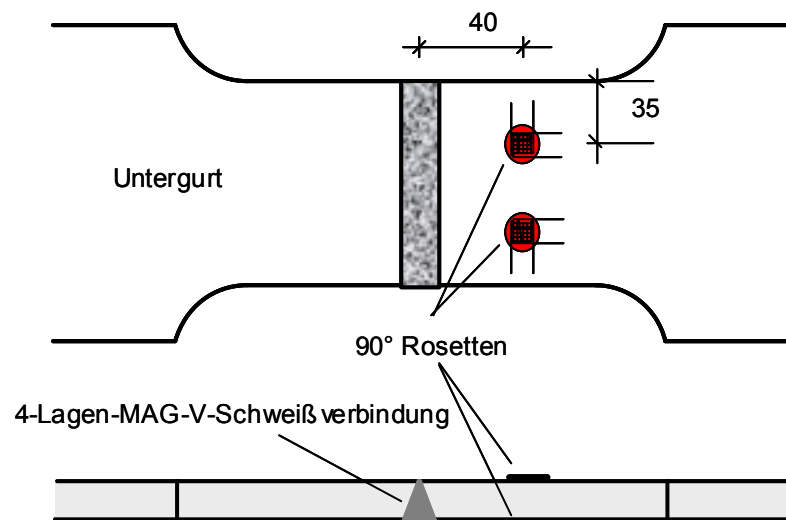


Abb. 5.16 Anordnung der DMS am Untergurt; Maße in mm

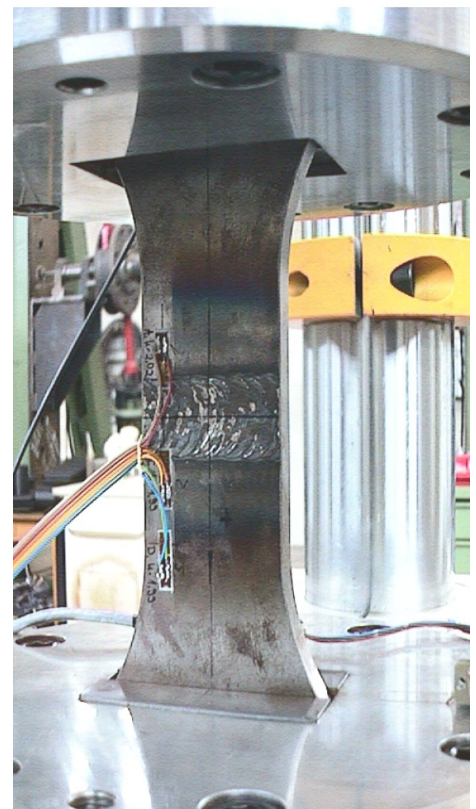
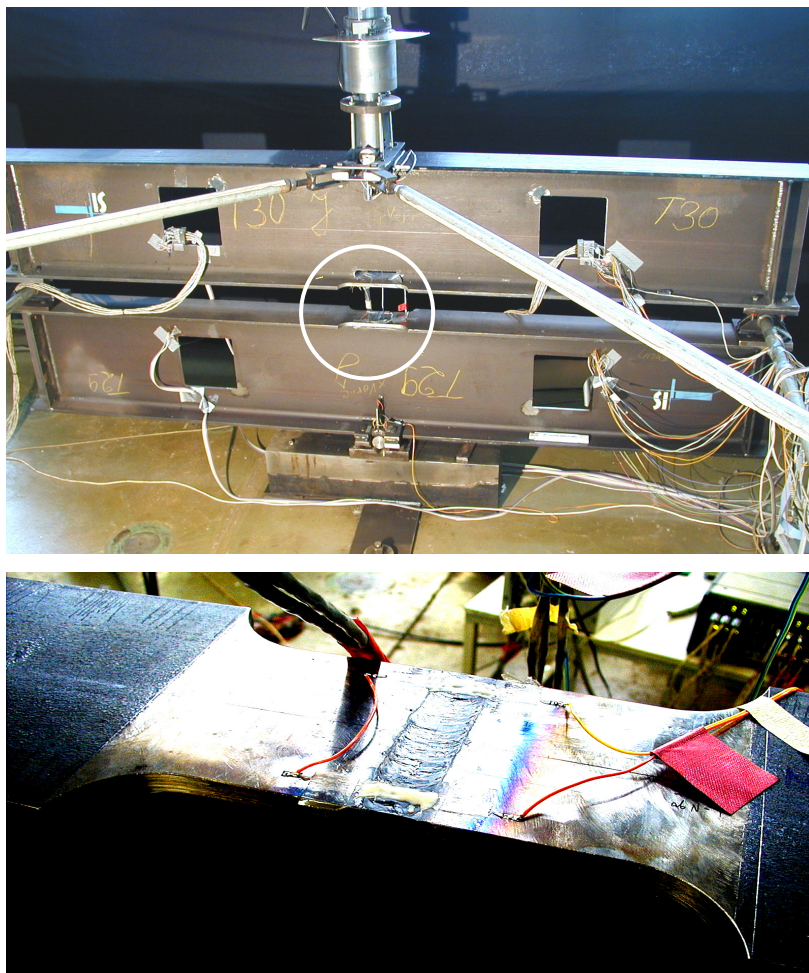


Abb. 5.17 Links: zwei Ersatzbauwerke mit dem Kerbdetail Schweißverbindung im Untergurt und Detailvergrößerung (nur der obere Träger ist mit DMS bestückt); Rechts: Entsprechende axial belastete Kleinprobe in der Prüfmaschine;

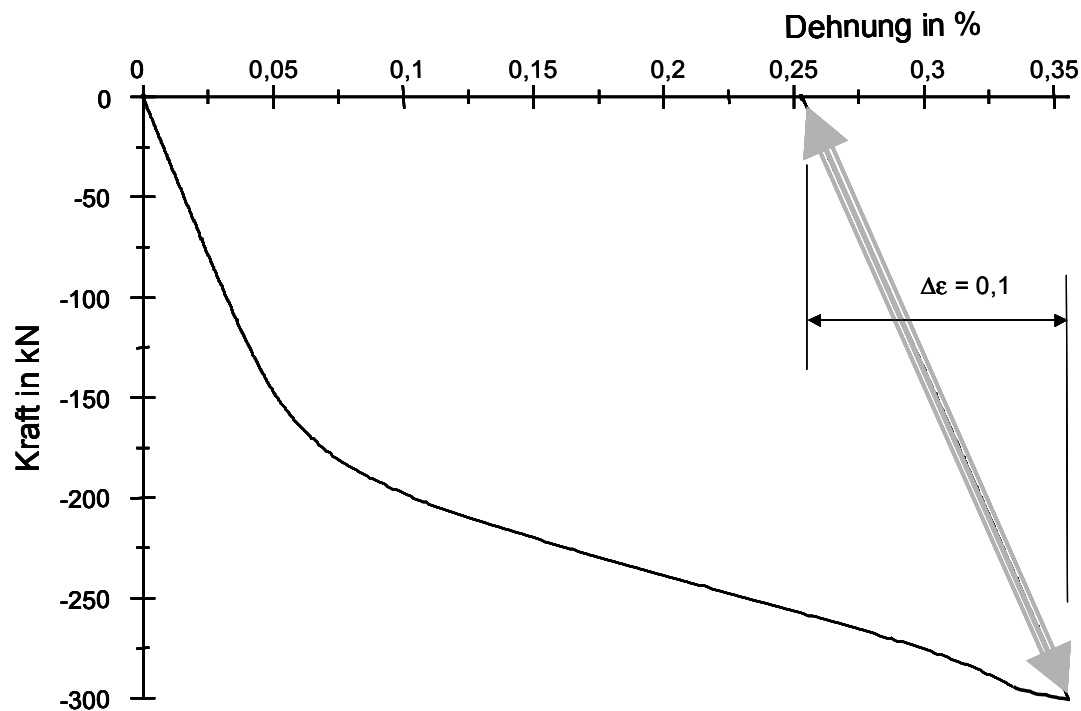


Abb. 5.18 Kraft- Dehnungs-Beziehung aufgezeichnet an der Untergurt-Schweißverbindung während des ersten Lastwechsels

Im Rahmen der Untersuchungen des Teilprojekts B4 wurde anhand von Proben eine Wöhlerlinie für die 4-Lagen MAG-V-Schweißverbindung mit plangeschliffener Wurzelseite aufgestellt [LACH 02]. Schweißnähte von Großbauteilen sind wegen der Schrumpfbehinderung viel stärker eigenspannungsbehaftet als identische Nähte von Kleinproben. Wie die Kraft-Dehnungs-Beziehung gemäß Abb. 5.18 zeigt, führen die Eigenspannungen in der Prüfnäht des Ersatzbauwerks bereits bei einer geringen Dehnung von ca. 0,05 % zu einem nichtlinearen Kurvenverlauf. Der Grund dafür ist, dass die DMS nach dem Schweißen auf das bereits unter Spannung stehende Material appliziert wurden. Es erfolgte dann ein Nullabgleich. Im Gegensatz zum Großbauteil (Ersatzbauwerk) ist die Schweißnaht der Laborprobe eigenspannungsarm, da sich die Probe nach dem Herausnehmen aus der Schweißvorrichtung weitgehend frei verformen kann. Somit sind unterschiedliche Anrisslebensdauern für das Ersatzbauwerk und für die Probe zu erwarten.

Soll die Lebensdauer von geschweißten Großbauteilen mittels Kleinproben bestimmt werden, kann die Berücksichtigung der Eigenspannungsunterschiede nach einem Vorschlag von OHTA durch sogenannte " $\sigma_{max} = \sigma_y$ tests" abgedeckt werden [OHTA 97]. Der Vorschlag basiert darauf, dass bei scharfen und eigenspannungsbehafteten Kerben wie Schweißnähten in Großbauteilen sich aus der Überlagerung der Last- und Eigenspannungen ein teilweiser Abbau der Eigenspannungen durch Fließen in solchem Ausmaß ergibt, dass sich in der Summe eine wirksame Oberspannung in Höhe der Streckgrenze einstellt (s.a. [GURN 72]). Gleiche Verhältnisse wie im Großbauteil werden bei der Kleinprobe dadurch simuliert, dass als Oberspannung die Streckgrenze des Werkstoffs gewählt wird

simuliert, dass als Oberspannung die Streckgrenze des Werkstoffs gewählt wird ($\sigma_o = \sigma_y$). Die Vorgehensweise wurde in [OHTA 97] anhand von Testergebnissen verifiziert. Der Grundgedanke wird u.a. durch den horizontalen Verlauf der Festigkeitsgerade im HAIGH-Diagramm für Schweißverbindungen mit starker Eigenspannung gestützt (s. z.B. [RADA 95]).

Hiervon unabhängig wurde am Ersatzbauwerk im Mittel eine sehr hohe Oberdehnung von ca. 0,35 % gemessen. Die Übertragung dieser Dehnung auf die Proben führt auf jeden Fall zu einer Überschreitung der Streckgrenze. Wären geringere Dehnungen gemessen worden, so hätte man wie zuvor beschrieben " $\sigma_{max} = \sigma_y$ tests" durchführen können. Ein weiterer Fall für die Anwendung von " $\sigma_{max} = \sigma_y$ tests" ergibt sich bei der Untersuchung von realen Bauwerken. Hier werden die DMS in der Regel nicht den ersten Lastwechsel erfassen, so dass nur $\Delta \varepsilon$ bekannt ist.

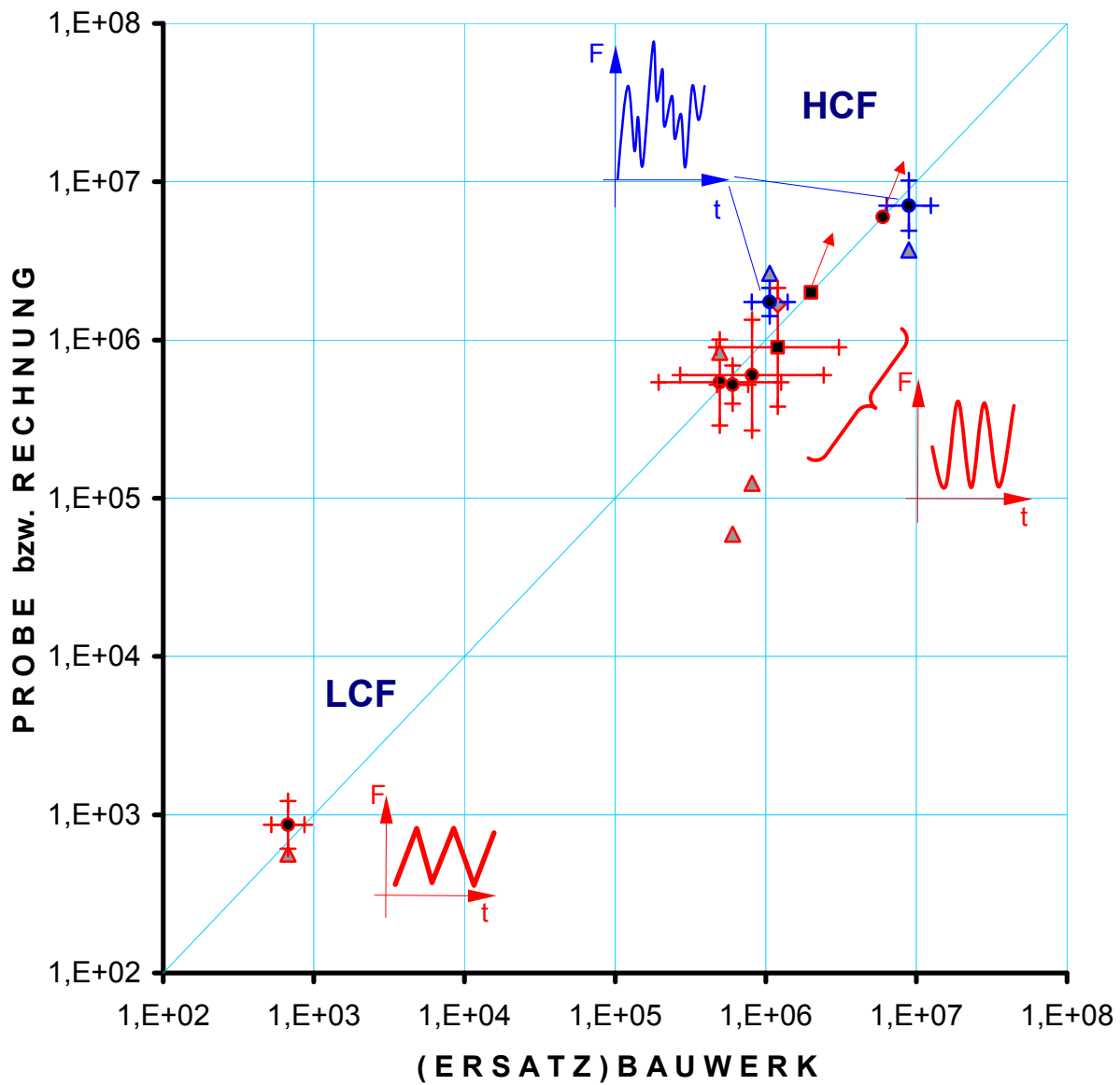
5.7.4 Steifenanschlüsse

Für die Steifenanschlüsse wurden bisher noch keine Lebensdauerversuche mit entsprechenden Proben durchgeführt. Im nächsten Abschnitt wird daher nur auf die Versuchsbeobachtungen am Ersatzbauwerk eingegangen. Die Anrisse der vorderen und hinteren Steife am Ersatzbauwerk wurden einzeln registriert. Somit gelten für dasselbe Kerbdetail pro Träger zwei Anrisslastwechselzahlen. Aufgrund der in Abs. 5.6.2.3 angesprochenen Lastumlagerung nach dem Anriss einer der Steifen ist die zweite Anrisslastwechselzahl nicht unabhängig von der ersten.

5.8 Bisherige Ergebnisse

5.8.1 Aussparungsecken

Diagramm 5.19 fasst das Ergebnis der Untersuchungen zusammen. Darin sind die 50%-Fraktilen aus der Anrisslastwechselzahlen der Ersatzbauwerksdetails über die Abszisse aufgetragen, die zugehörigen Prognosen aus Versuchen an Proben über die Ordinate. Identische Mittelwerte der Lebensdauer der Ersatzbauwerke und die der zugehörigen Proben würden auf der Diagonalen des Diagramms liegen. Jeder Versuchsreihe liegen bis zu 14 Einzelversuche sowohl für die Ersatzbauwerke als auch für die Proben zugrunde. Zu jedem Mittelwert $N_{50\%}$ ist noch das 95%-Konfidenzintervall dargestellt. Streuspannen T_N sowie einzelne Anrisslastwechselzahlen sind den Anlagen 5.17 bis 5.22 zu entnehmen. Dort sind neben den Kräften auch die Mittelwerte der Dehnungsmessungen für den ersten Lastwechsel von Be- und Entlastung zur Kennzeichnung der Beanspruchung dargestellt.



Kerbdetail		
N_{Anriss} Experiment	<div> <div>95% KONF</div> <div> <div>←</div> <div>→</div> </div> <div> <div>+</div> <div>•</div> <div>+</div> </div> <div> <div>+</div> <div>+</div> </div> <div>$N_{50\%}$</div> </div>	
N_{Anriss} Kerbgrund- konzept		
Durchläufer		

Abb. 5.19 Ergebnis der Lebensdauervorhersagen

Die Anrisslastwechselzahlen der Ersatzbauwerke und Proben stimmen gut überein, d.h. das Verfahren hat bisher die Erwartungen erfüllt. Die geringen Abweichungen zum Idealfall, d.h. sämtliche Wertepaare der Mittelwerte liegen auf der Diagonalen, sind auf die zum Teil noch relativ geringen Versuchszahlen zurückzuführen. Es wird vermutet, dass sich diese Abweichungen durch weitere Einzelversuchsergebnisse reduzieren lassen.

5.8.2 Schweißverbindung im Untergurt

Die Schweißverbindung im Untergurt ist für die Tragfähigkeit des Ersatzbauwerks das wichtigste Element. Aus diesem Grund wurde sie zum Beginn der Untersuchungen bei der Auslegung des gesamten Ersatzbauwerks im Vergleich zu den anderen Details geringfügig überdimensioniert. Wegen der plangeschliffenen Wurzelseite der Schweißnaht verläuft die zugehörige Wöhlerlinie deutlich günstiger als die Wöhlerlinie einer V-Naht aus dem Kerbfallkatalog [OLIV 79], welche anfangs näherungsweise der Dimensionierung zugrunde gelegt wurde (Abb. 5.20). Daher traten bei dem bisher untersuchten Beanspruchungsniveau einige Durchläufer auf. Das Ergebnis für das Kerbdetail der Schweißverbindung ist ebenfalls in Abb. 5.19 angegeben und liegt nahe der Diagonalen des Diagramms (vgl. auch Anlage 5.23). Die für die Prüfnahat des Ersatzbauwerks festgestellten Anrisslastwechselzahlen und Durchläufer lassen sich außerdem sehr gut in das mittels Proben erstellte Wöhlerdiagramm einordnen (vgl. Abb. 5.20).

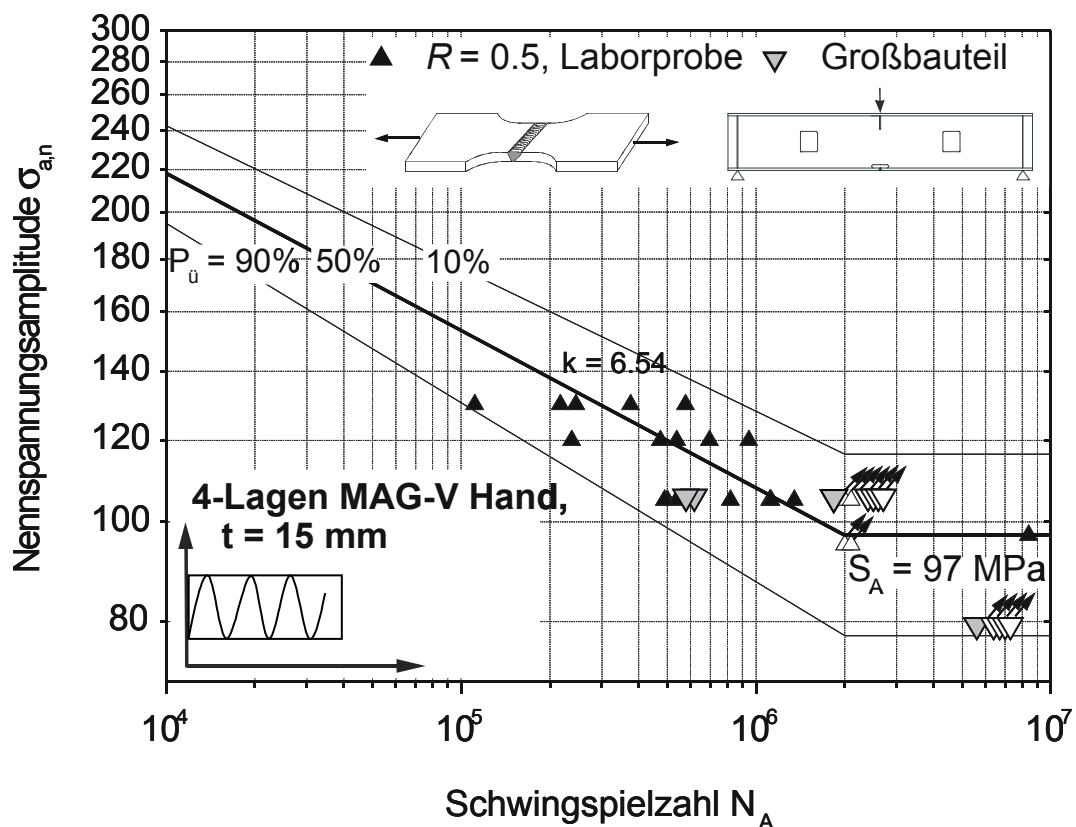


Abb. 5.20 Wöhlerlinie zu der Schweißnahtverbindung im Untergurt [LACH 02]

5.8.3 Steifenanschlüsse

Berücksichtigt man entsprechend den Belastungsverhältnissen vor und nach dem ersten Anriss für jeden Träger zwei Anrisslastwechselzahlen für den Steifenanschluss (vgl. Anlage 5.24), lassen sich die Versuchsergebnisse im Wahrscheinlichkeitsnetz gemäß Abb. 5.21 darstellen. Zu jeder Reihe sind die Ausgleichsstreugeraden eingezeichnet. Ein Steifenpaar ist durch die Verbindungslinien zwischen den Punkten gekennzeichnet. Zur besseren Übersicht sind hier die Ergebnisse der Versuchsreihe "Wöhler IIa" nicht dargestellt. Sie zeigen einen ähnlichen Verlauf, jedoch mit einem größeren Abstand zwischen den Ausgleichsgraden (vgl. Anlage 5.25). Anhand der Verbindungslinien der Anrisslastwechselzahlen ist leicht zu erkennen, dass nach dem ersten Anriss die Lastwechselzahl bis zum Anriss der zweiten Steife stark streut (man beachte den horizontalen Abstand der Punkte eines Paares und die logarithmische Skalierung). Diese Streuung ist zum einen auf die manuell gefertigten Schweißverbindungen zurückzuführen, zum anderen auf die Wälztoleranzen (nicht parallele Flansche), welche zu komplizierten und ungleichen Beanspruchungen der Steifen führen können (vgl. Abs. 5.5.2.3). Hinzu kommt noch die natürliche Streuung von Anrisslastwechselzahlen.

Die Steifenanschlüsse zeigen außerdem unterschiedliche Anriss- und Bruchbilder. Typische Bruchbilder sind in Abb. 5.22 zusammengestellt. In Anlage 5.25 sind die Anrisslastwechselzahlen, nach Betrag sortiert, dargestellt. Zusätzlich ist noch zu jeder Lastwechsel-

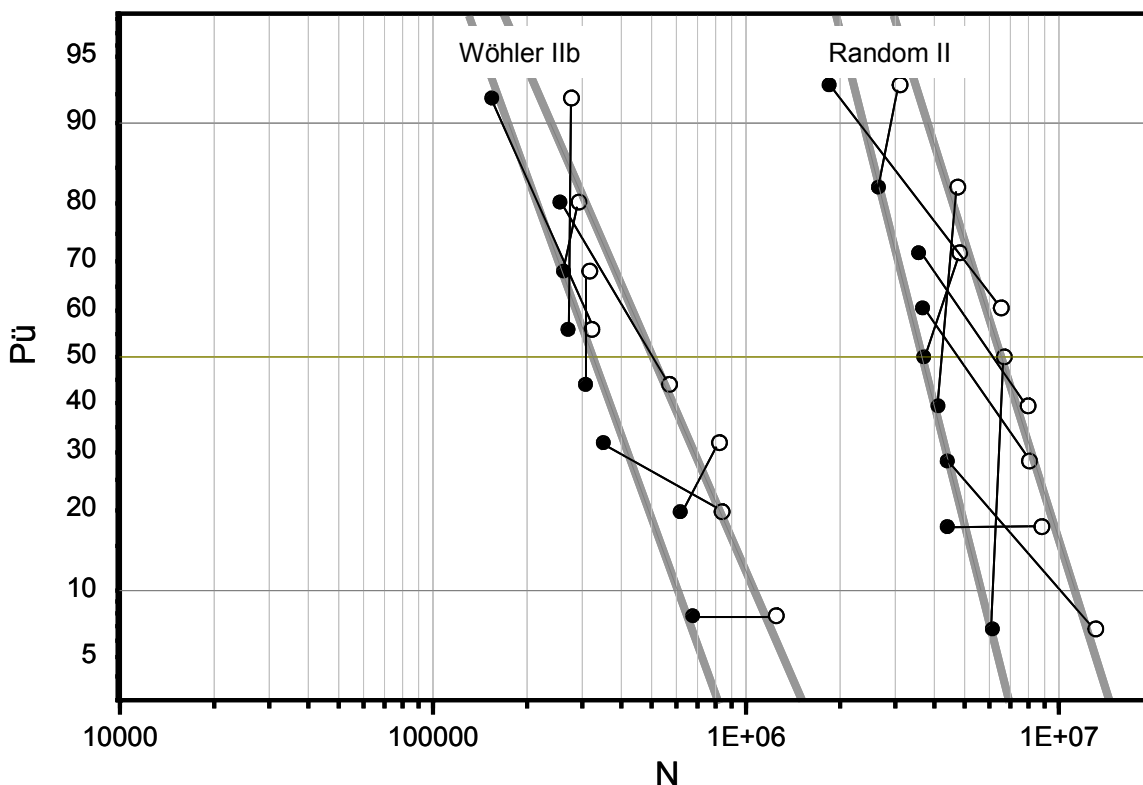


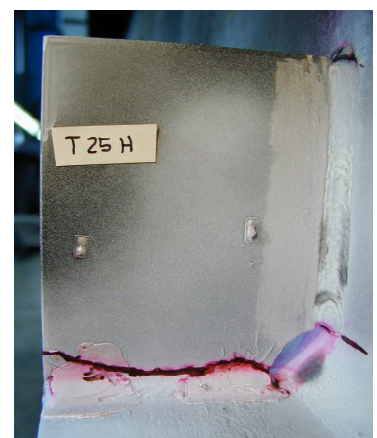
Abb. 5.21 Ergebnisse der Anrisslastwechselzahlen der Steifenanschlüsse



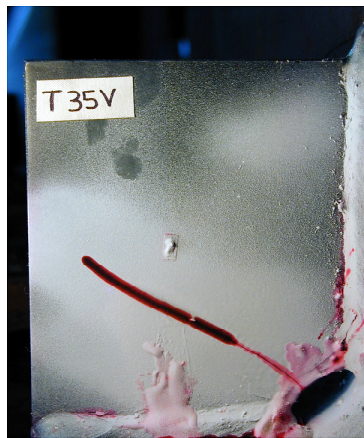
I) Nahtübergang am Trägerflansch (n)



II) Nahtübergang zur Steife (n)



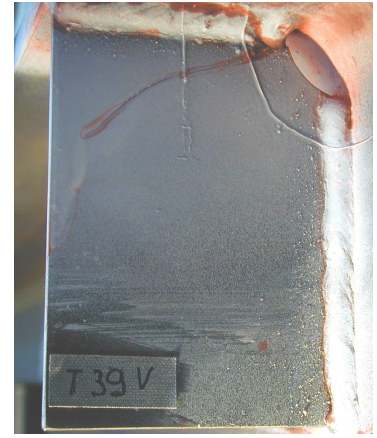
III) wie II) Fortsetzg. im Steifenblech (n)



IV) Nur im Steifenblech (b)



V) In der Naht beginnend durch das Steifenblech (nb)



VI) wie V) aber im Nahtübergang zum Steifenblech beginnend (nb)

Abb. 5.22 Verschiedene Bruchbilder der Steifenanschlüsse, hervorgehoben durch Farbeindringverfahren; in Klammern: Kennbuchstabe des Bruchbildes, vgl. auch Anlage 5.25

zahl das zugehörige Bruchbild durch den entsprechenden Buchstaben gemäß Abb. 5.22 angegeben. Die bisherigen Ergebnisse lassen keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen einem Bruchbild und der zugehörigen Belastungsart oder Belastungshöhe bzw. der Anrisslastwechselzahl erkennen.

5.8.4 Rechnerischer Vergleich

Die Ergebnisse für Ersatzbauwerke in Abb. 5.19 wurden mit Hilfe des Kerbgrundkonzepts und der linearen Schadensakkumulationshypothese von Palmgren-Miner nachgerechnet (vgl. Anlagen 5.26 und 5.27). Die zyklischen Werkstoffkennwerte wurden mit Hilfe des sog. Uniform Material Law abgeschätzt [SEEG 96]. Zur Bestimmung der Kerbbeanspruchung wurde ausgehend von den Belastungsparametern jeder Versuchsreihe zunächst die Hook'sche Spannung mit Hilfe einer FE-Berechnung bestimmt. Die Hook'sche Spannung wurde dann mit Hilfe der Neuberhyperbel in eine elastisch-plastische Kerbgrundbeanspruchung umgerechnet [NEUB 85].

In Abb. 5.19 sind die rechnerischen Ergebnisse durch Rauten- bzw. Dreieckssymbole dargestellt. Dabei wurden als Wertepaare jeweils die 50% Fraktile der Anrisslastwechselzahlen der Ersatzbauwerksdetails auf der Abszisse und das rechnerische Ergebnis auf der Ordinate aufgetragen. Mit Ausnahme des LCF-Falles sind alle experimentell ermittelten Lebensdauern zutreffender als die berechneten. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass in der Praxis die Randbedingungen für eine auf Modellen basierende rechnerische Prognose viel ungünstiger sind. Hier wurden generell bereits bekannte Beanspruchungen der Berechnung zugrunde gelegt, die Unsicherheit des Last- und des Systemmodells war also ausgespart.

Bei den Aussparungsecken handelt es sich um relativ eigenspannungsarme Kerbdetails, welche frei von Fehlstellen sind. Sie zeigen kaum Fertigungstoleranzen (vgl. Anlage 5.12 / 5.13) und ihre Beanspruchung lässt sich verhältnismäßig genau bestimmen. Dennoch liegen zum Teil die rechnerischen Ergebnisse weit außerhalb des Konfidenzintervalls, welches für die mittlere Lebensdauer des Ersatzbauwerksdetails gilt.

Bei eigenspannungsbehafteten Kerbdetails wie Schweißnähten, welche zudem eine unregelmäßige Oberfläche aufweisen, lässt sich die Kerbbeanspruchung nicht sehr genau bestimmen. Schweißnähte müssen teilweise unter Baustellenbedingungen ausgeführt werden, wodurch die Wahrscheinlichkeit für Unregelmäßigkeiten in Nahtgeometrie und Gefüge steigt.

Die vorliegende Schweißverbindung wurde im Labor von einem Lehrscheiße gefertigt. Die Kerbformzahl wurde auf Grundlage einer aufwendigen Vermessung der Nahtgeometrie und einer FE-Modellierung relativ genau bestimmt. Ausgehend von den Belastungsparametern des Ersatzbauwerks ohne Berücksichtigung der Eigenspannung ergab die Berechnung der Lebensdauer der Naht zunächst eine Anrisslastwechselzahl von $40 \cdot 10^6$. Diese Zahl ist ca. 33 mal höher als das Versuchsergebnis. Das Ergebnis lässt sich korrigieren, wenn kein Systemmodell verwendet wird und stattdessen die Informationen aus der Messung einfließen. Demnach steht die Schweißnaht unter starker Eigenspannung (vgl. Abs. 5.7.3, Abb. 5.18). Das Ergebnis einer detaillierten Untersuchung der Eigenspannungen in Längs- und Querrichtung zur Nahtlängsachse sowie ihre Änderungen durch die Belastung kann [LACH 02] entnommen werden. Der Einfluss der Eigenspannungen auf das Ermüdungsverhalten darf in diesem Fall nicht vernachlässigt werden, da sie sich im Laufe der Lastwechsel nur teilweise abbauen bzw. nur die Richtung zur Nahtlängsachse ändern.

Die Spannungsdoppelamplitude wurde daher gemäß Abb. 5.18 entsprechend der gemessenen Dehnung von 0,1 % mit 210 N/mm^2 angesetzt. Zur Berücksichtigung der Eigenspannung wurde analog Abs. 5.7.3 als Oberspannung eine Nennspannung auf der Höhe

des Fließplateaus von rund 400 N/mm^2 angenommen. Ausgehend von diesen Belastungsparametern ergibt die Berechnung eine Anrisslastwechselzahl von ca. $1,7 \cdot 10^6$, die in etwa dem Versuchsergebnis $1,2 \cdot 10^6$ entspricht.

6 Zusammenfassung

6.1 Bewertung der Ergebnisse

In der vorliegenden Arbeit wird eine zuverlässige Methode zur Ermittlung der Lebensdauer ermüdungsbeanspruchter Bauwerke vorgestellt. Die üblichen Methoden der Lebensdauer-vorhersage basieren auf einer Nachweiskette, die sich zu den drei Modellen



zusammenfassen lässt. Aufgrund der Unsicherheiten, die den einzelnen Modellen eigen sind, ist die Zuverlässigkeit der Prognosen gering. Die größte Unsicherheit ist dem Schädigungsmodell zuzuschreiben. Durch Kombination von Monitoring-Strategien an Bauwerken und ermüdungssimulierenden Laborversuchen lassen sich die unsicheren Modelle weitgehend vermeiden, so dass deutlich bessere Vorhersagen des Ermüdungsverhaltens stählerner Tragwerke möglich sind.

Um Unsicherheiten des Einwirkungs- und Systemmodells zu vermeiden, werden die Beanspruchungen direkt an den kritischen Details des Bauwerks gemessen. Da die gemessenen Beanspruchungszeitreihen dem Zufall unterliegen, werden auf der Grundlage einer statistischen Auswertung synthetische Beanspruchungszeitreihen generieren, welche die wichtigsten Eigenschaften der realen Beanspruchung aufweisen. Die Unsicherheiten des Schädigungsmodells können vermieden werden, indem die Lebensdauer durch Laborversuche an geeigneten Proben bestimmt wird. Die Proben bilden die kritischen Details des Bauwerks exakt nach. Sie werden durch die synthetischen Beanspruchungszeitreihen beansprucht. Zur Erfassung und Berücksichtigung von unvorhersehbaren Änderungen bzw. Trends der Belastungsentwicklung ist es dabei sinnvoll, die Lebensdauerversuche etappenweise adaptiv durchzuführen.

Aufgrund der verhältnismäßig langen Lebensdauer realer Bauwerke ist die Prüfung der Treffsicherheit der vorgestellten Methode an realen Bauwerken problematisch. Aus diesem Grund werden zur Validierung des Verfahrens "definierte" Bauwerke im Labor, sog. Ersatzbauwerke, untersucht. Diese Ersatzbauwerke zeigen im Vergleich zu realen Bauwerken infolge einer zeitgerafften und pausenlosen Belastung naturgemäß eine viel kürzere Lebensdauer. Ein weiterer Vorteil von Ersatzbauwerken besteht darin, dass das gesamte, zur Validierung erforderliche Spektrum an Kerbdetails, Lastwechselbereichen und Belastungsprozessen beliebig und stufenlos untersucht werden kann.

In der vorliegenden Arbeit werden 6 Versuchsreihen mit Ersatzbauwerken vorgestellt. Die Anrisslebensdauer verschiedener Kerbdetails der Ersatzbauwerke ließ sich in allen Fällen

anhand von adäquaten Proben recht genau prognostizieren. Die Bestimmung adäquater Formen der Proben sowie ihrer im Vergleich zum Ersatzbauwerk äquivalenten Belastung wird diskutiert. Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen konnten durch den Einsatz sinnvoller Versuchstrategien über 220 Einzelergebnisse mit Anrisslastwechselzahlen von bis zu $10 \cdot 10^6$ gewonnen werden. Durch das Versuchskonzept ergaben sich erhebliche Einsparungen sowohl hinsichtlich der Gesamtversuchszeit als auch der Maschinen- und Energiekosten.

Besonders wichtig bei der experimentellen Lebensdauerbestimmung von Bauwerken ist die Zugrundelegung eines geeigneten Beanspruchungsschriebs, welcher für die gesamte Nutzungsdauer repräsentativ ist. Ein solcher Schrieb kann nicht zufällig im Betrieb gemessen werden, sondern muss auf Grundlage statistischer Parameter, die aus Dauermessungen gewonnen werden, generiert werden. Synthetische Beanspruchungszeitreihen ermöglichen u.a. eine Extrapolation über die messtechnisch erfasste Betriebszeit hinaus. Da die Reihenfolgeeffekte bekanntlich einen beachtlichen Einfluss auf die Lebensdauer haben können, müssen sie bei der Generierung synthetischer Beanspruchungszeitreihen unbedingt berücksichtigt werden. Es werden neue Generierungsalgorithmen vorgestellt, welche im Gegensatz zu den herkömmlichen Generierungsmethoden in der Lage sind, die Beanspruchungsreihenfolgen statistisch korrekt wiederzugeben. Die hierzu erforderlichen speziellen Auswertemethoden wurden basierend auf Methoden der Cluster- und Diskriminanzanalyse entwickelt. Zur Berücksichtigung von Lastreihenfolgen bei der Generierung wird eine diskriminanzanalytische Vorgehensweise mit der Monte-Carlo-Methode kombiniert. Darüber hinaus wird der Einsatz der Diskriminanzanalyse als Alternative zu einer Videoüberwachung zur Fahrzeugidentifizierung vorgestellt.

Die zur Entwicklung der Auswerteverfahren erforderlichen Beanspruchungszeitreihen wurden aus Messungen an einer Autobahn- und einer Eisenbahnbrücke gewonnen. Zur kontinuierlichen Dauermessung wurde eine Messanlage mit Fernüberwachungsfunktion konzipiert. Sie ist an der Eisenbahnbrücke seit deren Fertigstellung installiert, so dass bis dato die Beanspruchungsgeschichte bekannt ist.

Für neue Bauwerke kann die synthetische Beanspruchungszeitreihe mit Hilfe des neu entwickelten Verfahrens in Form einer Umkehrpunktfolge erzeugt werden. Die Eignung der synthetischen Folgen für die experimentelle Lebensdauerermittlung wurde dabei anhand von speziellen Ermüdungsversuchen geprüft und als sehr gut befunden. Zur Untersuchung bereits bestehender Bauwerke wird eine Methode vorgeschlagen, die sich zur wirklichkeitsnahen Generierung von Beanspruchungs-Zeit-Funktionen der Vergangenheit besonders gut eignet.

6.2 Ausblick

Das vorgeschlagene Verfahren hat die Erwartungen bisher vollständig erfüllt. Für eine endgültige Validierung sind weitere Untersuchungen erforderlich. Im Zuge der Untersuchungen konnten etliche Fern- und Nahziele definiert werden:

Grundsätzliche Untersuchungen

Zur Erhöhung der statistischen Aussagekraft sind weitere Tests erforderlich. Dabei sollten die Versuchsreihen auf einer Variation folgender Punkte ausgedehnt werden:

Last-Zeitverläufe (Schmal – und Breitbandprozesse, Amplituden),
Kerbdetails (u.a. eigenspannungsempfindliche Kerbdetails),
Baustahlorten bzw. -chargen,
Lastwechselzahlbereiche, vor allem höhere Lastwechselzahlbereiche,
Ersatzbauwerkssysteme.

Lebensdauer des Gesamttragwerks

Bisher wurde als Grenzzustand der erste Anriss am kritischen Nachweisort definiert. Der erste Anriss wird jedoch nur in wenigen Fällen das endgültige Versagen eines Bauwerkes bedeuten. Bei innerlich unbestimmten Bauwerken treten nach erfolgtem Anriss Umlagerungen auf, die u.U. dazu führen, dass der Rissbereich entlastet wird und andere Bereiche stärker belastet werden. Als Grenzzustand wird deshalb für die anstehenden Untersuchungen ebenfalls das Erreichen der Traglast des Bauwerkes oder eines wesentlichen Bauteiles angesehen. Hierbei ist zu beachten, dass durch die Umlagerungen auch ein *Wechsel* der vorab festgelegten, *kritischen Schadensorte* auftreten kann. Dies muss zu einer Modifikation der Monitoring-Strategie führen. Ggf. müssen neue potentielle Schadensorte überwacht werden.

Zur Prognose der Lebensdauer eines Gesamtbauwerks oder eines wesentlichen Teils davon werden deshalb derzeit im Rahmen des SFB 477-Teilprojektes B3 Untersuchungen mit Hilfe der Bruchmechanik vorgenommen. Das Risswachstum wird mit einem FE-Modell simuliert, das durch Risswachstumsmessungen kalibriert wird (vgl. Anlagen 5.1 bis 5.3). Dabei werden die bruchmechanischen Kennwerte anhand des beobachteten Rissverlaufs kalibriert. Die Kalibrierung kann entweder anhand des an Proben beobachteten Rissverlaufs erfolgen oder adaptiv unmittelbar anhand des beobachteten Rissverlaufs am Bauwerk selbst.

Mit dem angepassten bruchmechanischen Modell wird auf das "tatsächliche" Bauwerksverhalten während der Risswachstumsphase extrapoliert. Umlagerungen sowie Veränderungen der kritischen Schadensorte werden erkannt. Es können Versagenspfade unter-

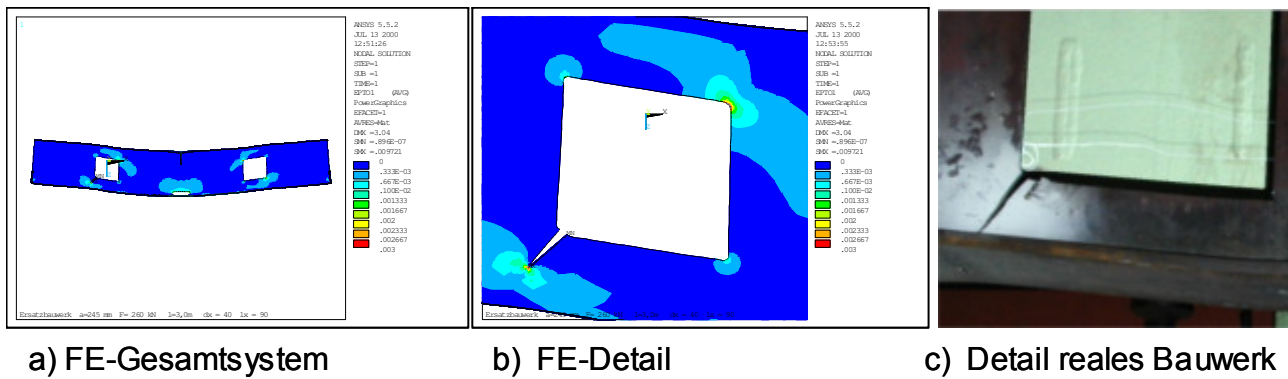


Abb. 6.1 Untersuchung des Systemverhaltens nach dem Anriss mit Hilfe der Bruchmechanik

sucht werden. Abb. 6.1 zeigt die Umlagerung der Beanspruchung auf die diagonal gegenüberliegende Ecke nach erfolgtem Anriss. Erste Ergebnisse sind in [PEIL 00a] wiedergegeben. Für weitere Untersuchungen in diesem Zusammenhang könnte die nächste Generation von Ersatzbauwerken durch eine kleine Modifikation des aktuellen Systems gemäß Abb. 6.2 entwickelt werden.

Lebensdauer bestehender Bauwerke

Es wurde gezeigt, wie die Beanspruchungs-Zeit-Funktionen der Vergangenheit rekonstruiert werden können. Zur experimentellen Absicherung sollten Tests an Details demonstrierter Bauwerke durchgeführt werden. Solche Bauwerke sind beispielsweise verfügbar, wenn sie im Zuge der Verbreiterung eines Streckenabschnitts durch ein neues ersetzt werden. Vor der Demontage sind zur Gewinnung von streckenspezifischen statistischen Parametern und zur Kalibrierung des Bauwerkmodells In-situ-Messungen erforderlich. Die demontierten Details werden durch eine Laborbelastung bis zum Anriss beansprucht. Pa-

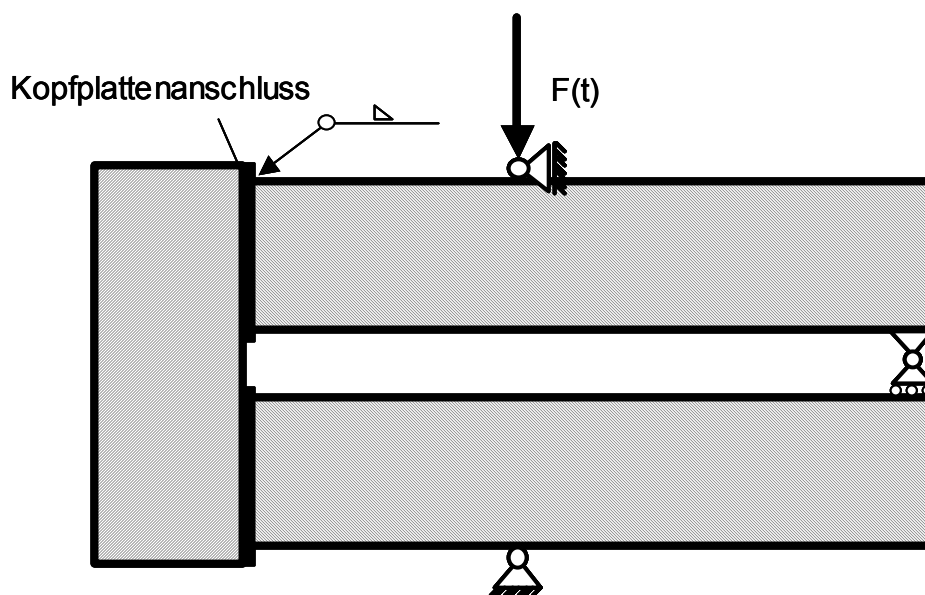


Abb. 6.2 Vorschlag für ein neues Ersatzbauwerk durch Modifikation des aktuellen Systems aus Abb. 5.1

parallel dazu werden entsprechende, neu erstellte Proben zuerst durch eine Belastung mit den rekonstruierten Beanspruchungs-Zeit-Funktionen auf das Ermüdungsniveau der demontierten Details gebracht und anschließend durch entsprechende Laborbelastung bis zum Anriss beansprucht. Durch den Vergleich der Anrisslastwechselzahlen für die demontierten Details und für die Proben kann die Treffsicherheit bei der Bestimmung der Restlebensdauer bestehender Bauwerke überprüft werden.

Eine Untersuchung bestehender Bauwerke wirft u.U. folgende Fragen auf:

- Welche Methoden der Zustandserfassung können eingesetzt werden?
- Wie kann der alte Werkstoff zur Herstellung von Proben beschafft werden?
- besteht das verwendete Probenmaterial aus einem handelsüblichen Stahl, lässt sich dann das Versuchsergebnis durch einen Faktor auf Grundlage einfacher "Kalibrierermüdungsversuche" an entnommenen Kleinproben aus dem Bauwerk und an entsprechenden Kleinproben aus dem handelsüblichen Stahl korrigieren? Die Kleinproben könnten beispielsweise aus nicht bzw. kaum beanspruchten Bereichen des Bauwerks entnommen werden (vgl. z.B. [ÄKES 94]).

Auswirkung verschiedener Chargen auf das Ergebnis

Es soll an handelsüblichen Baustählen systematisch untersucht werden, wie sich das Verwenden von "bauwerksfremden" Chargen als Probenmaterial auf das Ergebnis auswirkt. Wie groß sind die Streuungen der Ergebnisse, wenn verschiedene Chargen verwendet werden? Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem Ergebnis und den aus der chemischen Analyse und dem Zugversuch ermittelten Materialkennwerten (vgl. [GASS 80]) ?

Erfahrung an realen Bauwerken

Bisher wurden Messungen an zwei realen Bauwerken durchgeführt. Weitere Messungen an anderen ermüdungskritischen Tragwerken, wie z.B. Krananlagen, Schilderbrücken, Antennenmasten, Türmen etc., bringen zusätzliche Informationen über das breite Spektrum möglicher Einwirkungen und erweitern darüber hinaus das Dauermetesstechnik-Know-how.

Transferfunktionen

Müssen bei einer Konstruktion viele Details gleichzeitig überwacht werden, kann die anfallende Datenmenge schnell sehr groß werden. In solchen Fällen sollen mit Hilfe von Transferfunktionen die Beanspruchungen einiger Punkte über die gemessenen Daten anderer Punkte ermittelt werden. Diese Transferfunktionen können dabei entweder rein analytisch oder besser mit Hilfe von Kalibriermessungen aufgestellt werden.

Erfassung von Korrosionserscheinungen

Aufgrund der langen Lebensdauer und oft ungünstigen Witterungsbedingungen werden an Bauwerken häufig Korrosionserscheinungen unterschiedlichen Ausmaßes beobachtet. In [SEEM 00] wird eine Möglichkeit aufgezeigt, den Einfluss von Korrosion auf die Dauerschwingfestigkeit im Labor zu untersuchen. Dabei werden künstlich korrodierte Proben getestet. Zur Erfassung des Phänomens Schwingungsrissskorrosion - also wenn eine Korrosionsnarbe immer wieder aufreißt - wird empfohlen, eine Versuchstechnik zu wählen, bei der die Korrosion parallel zu der mechanischen Belastung auf die Proben einwirkt. Die Einwirkungsdauer aus der Realität ist dann im Labor durch einen entsprechend intensiven Korrosionsangriff zu simulieren.

Literatur

- [AGER 99] Agerskov, H., Andkjær, J.: Fatigue in Steel Highway Bridges under Random Loading. Journal of Structural Engineering, Feb. 1999, S.152-162.
- [AGER 00] Agerskov, H.: Fatigue in Steel Structures under Random Loading. Journal of Constructional Steel 53 (2000) S. 283-305.
- [ÅKES 94] Åkesson B.: Fatigue Life of Riveted Railway Bridges. Chalmers University of Technology, Department of Structural Engineering, Division of Steel and Timber Structures, Publ. S94:6, Göteborg 1994.
- [ÅKES 96] Åkesson B., Edlund, B.: Remaining Fatigue Life of Riveted Railway Bridges. Stahlbau 65 (1996) 11, S. 429-436.
- [ANDK 95] Andkjær, J., Agerskov, H., Vejrum, T.: Fatigue Damage Accumulation in Steel Bridges under Highway Random Loading. 1st Europ. Conf. On Steel Structures, Eurosteel '95, Athen 1995.
- [AURI 94] Aurich, D.: Kann man den Ermüdungszustand von Bauteilen zerstörungsfrei ermitteln? Materialprüfung 36 (1994) 5, S. 160.
- [BACH 96] Bacher, J.: Clusteranalyse. R. Oldenbourg Verlag München Wien 1996.
- [BAIL 00] Bailey, E., O'Brien, E. J., Žnidarič, A.: Updating Traffic Load Modells for the Assessment of Existing Road Bridges. Proc. of 4th International Conf. On Bridge Management, RYALL, M., PARKE, G., HARDING, J. (ed.), Bridge Management Four, Guildford/Surrey 2000, S. 434-441.
- [BATH 00] Bathke, W., Stahlfeld, G.: Rissentstehung thermisch ermitteln. Materialprüfung 42 (2000) 3, S. 67-73.
- [BOGA 99] Bogath, J., Bergmeister, K.: Neues Lastmodell für Straßenbrücken. Bauingenieur 74 (1999) 6, S. 270-277.
- [BULL 76] Bulling H.: Entscheidungshilfen der Diskriminanzanalyse bei der Gewährung von Konsumentenkrediten und gewerblichen Krediten. Diss. TU Berlin 1976.

- [BRAN 94] Brandes, K.: Experimentelle Absicherung von Untersuchungen zur Restnutzungsdauer älterer Stahlbrücken. Stahlbau 63 (1994) 9, S. 273-278.
- [BRAN 96] Brandes, K., Knapp J., Herter, J.: Messungen an älteren Stahlbrücken zur Zustandsanalyse und Ermüdungsbeurteilung. Stahlbau 65 (1996) 11, S. 421-428.
- [BUND 89] Bundesanstalt für Straßenwesen: Jahresauswertung 1988 - Langzeitzählstellen. Reihe Straßenverkehrszählung Heft 45, Bergisch Gladbach.
- [BUXB 95] Buxbaum, O.; Kotte, K. L.; Zouhar, G.; Schott, G.; u. a.: Erhöhung der Genauigkeit der Lebensdauervorhersage durch Berücksichtigung der Reihenfolge. Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit, LBF, TU Dresden: Institut für Festkörpermechanik, Institut für Werkstoffwissenschaft, Abschlussbericht DFG-Vorhaben (1995).
- [BYER 97] Byers, W.G., Marley, M.J., Mohammadi, J., Nielsen, R.J, Sarkani, S.: Fatigue Reliability Reassessment Procedures: State-Of-The-Art Paper. Journal of Structural Engineering /March 1997, S. 271-276.
- [CLOR 86] Clormann, U.H., Seeger, T.: RAINFLOW–HCM, Ein Zählverfahren für Betriebsfestigkeitsnachweise auf werkstoffmechanischer Grundlage. Stahlbau 55(1986) 3, S. 65-71.
- [CORT 56] Corten, H. T., Dolan, T.J.: Cumulative Fatigue Damage. Proc. of the Int. Conf. on Fatigue of Metals, Inst. Of Mechanical Engineers (London , September 1956).
- [CUNI 96] Cuninghame, J., Kolstein, H., Paschen, M.: Ermüdungsversuche mit orthotropen Platten und Konsequenzen für die Beurteilung bestehender Fahrbahnplatten. Stahlbau 65 (1996) 11, S. 452-458.
- [DEMP 00] Dempsey, A.T., Keogh, D.L., Jacob, B.: Orthotropic Steel Bridges: Management Tools for Live Load and Fatigue Assessment. Proc. of 4th International Conf. On Bridge Management, RYALL, M., PARKE, G., HARDING, J. (ed.), Bridge Management Four, Guildford/Surrey 2000, S. 592-599.
- [DICL 95] Dicleli, M., Brunneau, M.: Fatigue-Based Methodology for Managing Impact of Heavy-Permit Trucks on Steel Highway Bridges. Journal of Structural Engineering / November 1995, S. 1651-1659.

- [EULI 97] Euliz, K.G., Kotte, K.L.: Das Nennspannungskonzept: Die Ermüdungslebensdauer vorhersagen. Teil 1+Teil 2, Materialprüfung 39 (1997) 3+4, S. 73-75 + S. 134-140.
- [EULI 98] Euliz, K.G., Hickethier, H., Kotte, K.L.: Lebensdauer bei Ermüdungsbeanspruchung vorhersagen. Materialprüfung 40 (1998) 6, S. 250-255.
- [FIED 94] Fiedler, B., Kolitsch, C.: Die Bauteilermüdung zerstörungsfrei ermitteln. Materialprüfung 36 (1994) 5, S. 167.
- [FISC 77] Fischer, R., Köbler, Hück, M., H.-G., Wendt, U., Schütz, W.: Eine dem stationären Gaußprozeß verwandte Beanspruchungs-Zeit-Funktion für Betriebsfestigkeitsversuche. Düsseldorf, Fortschr.-Ber. VDI-Z Reihe 5, Nr. 30 (1977).
- [FISC 79] Fischer, R., Köbler, H.-G., Wendt, U.: Synthese zufallsartiger Lastfolgen zur Anwendung bei Betriebsfestigkeitsuntersuchungen. Düsseldorf, Fortschr.-Ber. VDI-Z Reihe 5, Nr. 40 (1979).
- [FLEI 88] Fleischer, D.: Praktische Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit von Baukonstruktionen. Grundlagen Theorie Anwendung. Lehrstuhl und Laboratorium für Stahlbau, München / Neubiberg 1988.
- [FRAN 85] Franke, L.: Schadensakkumulationsregel für dynamisch beanspruchte Werkstoffe und Bauteile. Bauingenieur 60 (1985), S. 271-279.
- [FRYB 99] Frýba, L.: Statische, dynamische und Ermüdungseigenschaften orthotroper Platten mit Flachrippen. Stahlbau 68 (1999) 1, S.15-23.
- [GASS 69] Gassner, E., Haibach E.: Testing Procedure for the Design and Life Estimation of Fatigue-Sensitive Structures. Int. Conf. o. Structural Safety and Reliability, Ed. By Alfred M. Freudenthal, Pergamon Press, Oxford New York 1969, S. 299-321.
- [GASS 73] Gassner, E.: Zur experimentellen Lebensdauerermittlung von Konstruktionselementen mit zufallsartigen Beanspruchungen. Materialprüfung 15 (1973) 6, S. 197-205.
- [GASS 76] Gassner, E., Lipp, W., Dietz, V.: Schwingfestigkeitsverhalten von Bauteilen im Betrieb und im Betriebslasten-Nachfahrversuch. LBF - Technische Mitteilungen TM 76/76 [28].

- [GASS 80] Gassner, E., Lowak, H.: Wechselverformungsverhalten metallischer Werkstoffe und Lebensdauer bauteilähnlich gekerbter Probestäbe. Materialprüfung 22 (1980) 8, S. 327-332.
- [GEIS 95] Geißler, K.: Beitrag zur probabilistischen Berechnung der Restnutzungsdauer stählerner Brücken. Schriftenreihe des Instituts für Tragwerke und Baustoffe, Diss., Technische Universität Dresden, Dresden 1995.
- [GRAF 94] Graf, T., Zenner, H.: Lebensdauervorhersage. Vorhersagefehler aufgrund ungenauer Kenntnis der erforderlichen Kenngrößen. Materialprüfung 36 (1994) 3, S. 71-76.
- [GRUN 89] Grundmann, H.: Berichte zur Zuverlässigkeit der Bauwerke. Abschlussbericht SFB 96 "Zuverlässigkeit der Bauwerke", TU München 1989.
- [GUER 86] Guers, F.: Zuverlässigkeitsformulierung für Tragsysteme bei Ermüdungsbeanspruchung. Berichte zur Zuverlässigkeit der Bauwerke. Abschlusskolloquium SFB 96 "Zuverlässigkeit der Bauwerke", TU München 1986.
- [GURN 72] Guernsey, T.R., Maddox, S.J.: A Re-analysis of Fatigue Data for Welded Joints in Steel. The Welding Institute, Abington, Cambridge, Report E/44/72 (1972) oder IIW-Doc. XV. S. 342-374.
- [HAIB 70] Haibach, E.: Modifizierte lineare Schadensakkumulations-Hypothese zur Berücksichtigung des Dauerfestigkeitsabfalls mit fortschreitender Schädigung. LBF – Technische Mitteilung TM 50/70, 1970.
- [HAIB 72] Haibach, E.: Testing Procedure for the Design and Life Estimation of Fatigue-Sensitive Structures. Structural Safety and Reliability, Ed. By Freudenthal, Pergamon Press Oxford-New York (1972) S. 299-321.
- [HAIB 89] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit – Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989.
- [HANS 81] Hanschmann, D.: Ein Beitrag zur rechnergestützten Lebensdauervorhersage schwingbeanspruchter Kraftfahrzeugbauteile aus Aluminiumwerkstoffen. DFVLR-Forschungsbericht FB-81-10 (1981).
- [HARI 82] Harig, H., Weber, M.: Lebensdaueruntersuchungen an unlegierten Kohlenstoffstählen bei Zug-Druck-Beanspruchung. Materialprüfung 24 (1982) 5, S. 169.

- [HENN 57] Henning, H.J., Wartmann, R.: Stichproben kleinen Umfangs im Wahrscheinlichkeitsnetz. Mitteilungsblatt math. Statistik 9 (1957) S. 168-181.
- [HIRT 77] Hirt, M.A.: Neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Ermüdung und deren Berücksichtigung bei der Bemessung von Eisenbahnbrücken. Bauingenieur 52 (1977), S. 255-262.
- [HOFF 87] Hoffmann, K.: Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen. Darmstadt, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1987.
- [HÜCK 83] Hück, M., Thrainer, L., Schütz, W.: Berechnung von Wöhlerlinien für Bauteile aus Stahl, Stahlguss und Grauguss - Synthetische Wöhlerlinien. Bericht AFB 11 (1983), Dritte überarbeitete Fassung.
- [KLOOS 89] Kloos, K.H.: Kerbwirkung und Schwingfestigkeit. DVM-Bericht, Arbeitskreis Betriebsfestigkeit (1989), S. 7-40.
- [KASS 88] Kass, M. Witkin, A., Terzopoulos, D.: Snakes: Active Contour Models. Int. J. Comput. Vision, (1988), S. 321-331.
- [KOLS 00] Kolstein, M. H.: Fatigue Analysis of a Cracked Steel Deck using Measured Stress Spectra and Full-Scale Laboratory Tests. Proc. of 4th International Conf. On Bridge Management, RYALL, M., PARKE, G., HARDING, J. (ed.), Bridge Management Four, Guildford/Surrey 2000, S. 584-591.
- [KOST 74] Kosteas, D.: Einfluss des Stichprobenumfangs bei der statistischen und regressionsanalytischen Auswertung von Schwingfestigkeitsversuchen, insbesondere an Schweißverbindungen aus AlZnMg1. Mitteilungen aus dem Institut für Stahl- und Leichtmetallbau der Universität (TH) Karlsruhe, Aluminium 50 (1974) 2, S. 165.
- [KOTT 00] Kotte, K.L.: Berechnungskonzepte in Software umsetzen. Materialprüfung 42 (2000) 9, S.328-333.
- [KRÜM 98] Krümming, S.: Schallemissionsanalyse zum Nachweis der Materialermüdung von Baustahl. Diss. TU Braunschweig 1998.
- [LACH 02] Lachmann, C.: (Titel liegt noch nicht vor) Diss. TU Braunschweig 2002.

- [LANG 95] Langlais, T.E., Vogel, J.H.: Overcoming Limitations of the Conventional Strain-Life Fatigue Damage Model. Journal of Engineering Materials and Technology, Okt. 1995, Vol. 117, S. 103-108.
- [MAZZ 92] Mazzetti, A.: Praktische Einführung in Neuronale Netze. Hannover, Hans Heise Verlag, 1992.
- [MENS 00] Mensinger M.: Zum Ermüdungsverhalten von Kopfbolzendübeln im Verbundbau. Verlag Mainz, Wissenschaftsverlag, Aachen, 2000.
- [MOSE 79] Moses, F.: Weigh-In Motion System Using Instrumented Bridges. Transportation Engineering, Proceeding of ASCE, Vol105, No.TE3, 1979.
- [NANJ 94] Nanjo, A. et al.: Structural Reliability Assessment of Steel Girder Stiffeners on Urban Expressway Bridges. Structural Safety & Reliability (Ed. Schueller & Yao). Rotterdam, Baalkema 1994, S. 919-925.
- [NATH 93] Nather, F.: Ermüdung stählerner Straßenbrücken – Modellierung und Beispiele - Baustatik Baupraxis 5, Technische Universität München, 11. und 12. März 1993.
- [NAUB 99] Naubereit. H., Weihert, J.: Einführung in die Ermüdungsfestigkeit. München Wien, Carl Hanser Verlag, 1999.
- [NEUB 61] Neuber, H.: Theory of Stress Concentration for Shear Strained Prismatical Bodies with Arbitrary Non-linear Stress-Strain Law. J. of Appl. Mech. 28, 1961.
- [NEUB 85] Neuber, H.: Kerbspannungslehre. Berlin, Springer-Verlag 1985.
- [NEUL 75] Neuland, H.: Zur Vorhersage von Hang- und Böschungsrutschungen mit Hilfe der Diskriminanzanalyse. Diss. Univ. Köln 1975.
- [OEHL 95]. Oehlers, D.J., Ghosh, A., Wahab, M.: Residual Strength Approach to Fatigue Design and Analysis. Journal of Structural Engineering Vol. 121 No. 9, September 1995, S. 1271-1279.
- [OHTA 95] Ohta, A., Suzuki, N., Maeda, Y.: Fatigue Life Prediction of Huge Welded Structures Division. NRIM Research Activities, Okt-95, S.11-12.

- [OHTA 97] Ohta, A., Suzuki, N., Maeda, Y.: Effect of Residual Stresses on Fatigue of Weldment. Proc. of 50th Int. Conf. of Dynamically Loaded Welded Structures, San Francisco, July 14-15 1997, Welding Research Council New York, S.108-122.
- [OLIV 79] Olivier, R., Ritter, W.: Wöhlerlinienkatalog für Schweißverbindungen aus Baustählen, Bd. I-V. DVS-Verlag, Düsseldorf 1979-1985.
- [PAST 97] Pasternak, H., Horváth, L.: Untersuchung zyklisch beanspruchter Stahlbauteile mit Hilfe der Thermovision. Stahlbau 66 (1997) 3, S. 127-135.
- [PEIL 94] Peil, U., Nölle, H.: On Fatigue of Guyed Masts due to Wind Load. Structural Safety & Reliability (Ed. Schueller & Yao). Rotterdam, Baalkema 1994.
- [PEIL 95] Peil, U., Nölle, H.: Ermittlung der Lebensdauer hoher windbeanspruchter Bauwerke. Bauingenieur 70 (1995) S.21-33.
- [PEIL 96] Peil, U., Mehdiانpour, M.: Ermittlung der Restlebensdauer ermüdungsbeanspruchter Tragwerke durch Monitoring. Vorträge Stahlbautag 1996 Bremen. Stahlbau-Verlag GmbH, Köln 1996.
- [PEIL 97] Peil, U., Mehdiانpour, M.: Assessment of Life Cycle of Steel Structures under Fatigue Loading by Monitoring and Parallel Testing. Proc. Of International Conference on Non Destructive Testing NDT '97, Liverpool 1997.
- [PEIL 00a] Peil, U., Mehdiانpour, M., Frenz, M.: Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung, SFB 477 Arbeitsbericht 1998-2000, S. 59-77.
- [PEIL 00b] Peil, U.: Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung, SFB 477 Finanzierungsantrag 2001-2003.
- [PEIL 01] Peil, U., Mehdiانpour, M., Scharff, R.: Life Time Assessment of Existing Bridges. Structural Health Monitoring (Ed. Chang, F.-K.), Stanford 2001.
- [PEIL 02] Peil, U., Mehdiانpour, M., Frenz, M., Scharff, R.: Zuverlässige Lebensdauerbestimmung mit Hilfe von Monitoring. Stahlbau 71 (2002) 2, S. 134-144.

- [PETR 99] Petryna, Y., Krätzig, W.B.: Damage Indicators and Reliability Estimates of Deteriorating RC Structures. Proc. of ESREL '99 10th Europ. Conf. on Safety and Reliability / Munich 13-17. Sept. 1999, Safety and Reliability Schuëller&Kafka (eds.) 1999 Balkema, Rotterdam, S. 569-573.
- [RADA 95] Radaj, D.: Ermüdungsfestigkeit, Grundlagen für Leichtbau, Maschinen- und Stahlbau, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1995.
- [REPP 84] Reppermund, K.: Probabilistischer Betriebsfestigkeitsnachweis unter Berücksichtigung eines progressiven Dauerfestigkeitsabfalls mit zunehmender Schädigung. Diss. Hochsch. d. Bundeswehr München 1984.
- [REPP 86] Reppermund, K.: Ein Konzept zur Berechnung der Zuverlässigkeit bei Ermüdungsbeanspruchung. Stahlbau (1986) 4, S. 104-112.
- [ROHR 89] Rohrbach, C.: Handbuch für experimentelle Spannungsanalyse. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1989.
- [ROSS 64] Rossow, E.: Eine einfache Rechenschiebernäherung an die den normal scores entsprechenden Prozentpunkte. Qualitätskontrolle 9 (1964) Nr.12, S. 146-47.
- [SACH 83] Sachs, L.: Angewandte Statistik. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 1983.
- [SCHN 94] Schneider, J.: Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen. Grundwissen für Ingenieure. Zürich: Verl. der Fachvereine; Stuttgart: Teubner, 1994.
- [SCHO 97] Schott, G.: Werkstoffermüdung – Ermüdungsfestigkeit. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart, 1997.
- [SCHU 99] Schuëller, G.I., Kafka, P.: Safety and Reliability. Proc. of ESREL '99 10th Europ. Conf. on Safety and Reliability / Munich 13-17. Sept. 1999, Safety and Reliability, Schuëller&Kafka (eds.) 1999 Balkema, Rotterdam.
- [SCHÜ 91] Schütz, K.G.: Verkehrslasten für die Bemessung von Straßenbrücken. Bauingenieur 66 (1991), S.363-373.

- [SCHÜ 94] Schütz, W.: Fatigue Life Prediction by Calculation: Facts and Fantasies. Structural Safety & Reliability (Ed. Schueller & Yao). Rotterdam, Baalkema 1994, S. 1125-1131.
- [SCHÜ 00] Schütz, W., Heuler, P.: Miner's Rule Revisited. Materialprüfung 42 (2000) 6, S. 245-252.
- [SCHW 97] Schwarz, L.: Monitoring und Bauteilversuche zur Erlangung besserer Kenntnisse über das Tragverhalten. Stahlbau 66(1997) 9, S. 650-662.
- [SEDL 84] Sedlacek, G., Jaquemon, J.: Herleitung eines Lastmodells für den Betriebsfestigkeitsnachweis von Straßenbrücken. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, H. 430, 1984.
- [SEEG 77] Seeger, T., Beste, A.: Zur Weiterentwicklung von Näherungsformeln für die Berechnung von Kerbbeanspruchung im elastisch-plastischen Bereich. VDI-Fortschrittsbericht, Reihe 18, Heft 2, 1977.
- [SEEG 94] Seeger, T., Zacher, P.: Lebensdauervorhersage zwischen Traglast und Dauerfestigkeit am Beispiel ausgeklinkter Träger. Bauingenieur 69 (1994) S.13-23.
- [SEEG 96] Seeger, T.: Stahlbau Handbuch. Band 1 TeilB/12, Grundlagen für Betriebsfestigkeitsnachweise. Stahlbau-Verlagsgesellschaft, Köln 1996.
- [SEEM 00] Seeman, K., Gümpel, P., Schwarze, J., Jäkle, V.: Dynamische Festigkeitsuntersuchung an Mettnau-Brücke in Radolfzell. Stahlbau 69 (2000) 1, S. 1-9.
- [SIMU 99] Simunic, Z., Ozbolt, J., Mayer U.: Überwachung von Brückenbauwerken – Vergleich zwischen Berechnung und Messungen am Beispiel der Maslenica- Brücke. Bauingenieur 74(1999) 4, S.176-182.
- [SMIT 70] Smith, K.N., Watson, P., Topper, T.H.: A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals. Journal of Materials, IMLSA, Vol. 5 (1970) Nr. 4, S. 767-778.
- [SOBO 71] Sobol , I.M.: Die Monte-Carlo-Methode. Berlin DVW, 1971.
- [SPA 92] Spaethe, G.: Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen. Springer Verlag Wien – New York, 2.Auflage, 1992.

[TORG 94] Torgeir, M., Geir, O.H.: Fatigue Reliability Analysis of Offshore Structures considering the effect of inspection and repair. Structural Safety & Reliability (Ed. Schueler & Yao). Rotterdam, Baalkema 1994, S. 519-526.

[WÖHL 1863] Wöhler, A.: Über die Versuche zur Ermittlung von Festigkeit von Achsen, welche in den Werkstätten der Niederschlesisch-Märkischen Eisenbahn zu Frankfurt a.d.O. angestellt sind. Z. f. Bauwesen 13 (1863), Sp. 233-258.

[WOHL 88] Wohlfahrt, D.H.: Einfluss von Mittelspannungen auf die Dauerfestigkeit. VDI Berichte Nr. 661, 1988, S. 99-127.

[WOHL 00] Wohlfahrt, D.H., Lachmann, C.: Restlebensdauervorhersage für Schweißverbindungen an Stahlkonstruktionen und Maßnahmen zur kontrollierten Nutzungsausweitung. SFB 477, Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung, Arbeitsbericht 1998-2000, S. 79-94.

[YAMA 00] Yamada, K., Ojio, T., Kainuma, S. Itho, K.: Structural Behaviour and Rehabilitation of Fatigue Cracked Box Girder Bridge. In RYALL, M., PARKE, G., HARDING, J. (ed.), Bridge Management Four, Guildford/Surrey 2000, S. 287-294.

[ZENN 74] Zenner, H., Schütz, W.: Betriebsfestigkeit von Schweißverbindungen – Lebensdauerabschätzung mit Schadensakkumulationshypothesen. Schweißen und Schneiden 26 (1974), Heft 2, S. 41-45.

[ZENN 92] Zenner, H., Liu, J.: Vorschlag zur Verbesserung der Lebensdauerabschätzung nach dem Nennspannungskonzept. Konstruktion 44, S. 9-17, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1992.

[ZENN 99]. Zenner, H., Peter, F: Lastkollektive zuverlässig ermitteln. Materialprüfung 41(1999) 7-8, S. 28-33.

[ZENN 01] Zenner, H.: Reihenfolgeeffekte. Veröffentlichung des Instituts für Stahlbau und Werkstoffmechanik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 65, Darmstadt 2001.

Normen und Richtlinien

AWS-D1-1 Structural Welding Code, Part 10. Design of new tubular structures. American welding Society (1981).

Eurocode 3 Gemeinsame einheitliche Regel für Stahlbauten. CCE/CEC, 1993, Beuth Verlag GmbH Berlin.

DIN EN 10025 Warmgewalzte Erzeugnisse aus unlegierten Baustählen. Technische Lieferbedingungen, Beuth Verlag GmbH Berlin, März 1994.

DIN EN 10204 Arten von Prüfbescheinigungen. Beuth Verlag GmbH Berlin, August 1995.

DIN EN 10002 Zugversuch. Beuth Verlag GmbH Berlin, April 1991.

DIN 1025 Warmgewalzte I-Träger, Teil 5. Beuth Verlag GmbH Berlin, März 1994.

DIN 1072 Straßen - und Wegbrücken, Lastannahmen. Beut Verlag GmbH Berlin, Dez. 1985.

DIN 1076 Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen, Überwachung und Prüfung. Beut Verlag GmbH Berlin, März 1983.

DIN 17 100 Allgemeine Baustähle. Beuth Verlag GmbH Berlin, Januar 1980.

DIN 18800 Stahlbauten. Teile 1 bis 4, Beuth Verlag GmbH Berlin, Nov.1990.

DIN 15018 Kräne, Teile 1 bis 3. Beuth Verlag GmbH Berlin, Nov.1984.

DIN 4132 Kranbahnen, Stahltragwerke. Beuth Verlag GmbH Berlin, Februar 1981.

DS 805 Bestehende Eisenbahnbrücken - Bewertung der Tragsicherheit und konstruktive Hinweise. DB gültig vom 01.03.91.

DS 804 Vorschrift für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke, DB gültig vom 01.01.93.

DS 803 Vorschrift für die Überwachung und Prüfung von Kunstbauten, DB gültig vom 01.01.83.

UK-DoE-T Offshore installations - guidance on design and construction. United Kingdom, Department of Energy Draft. London (1981).

Anlagen

Zu Kapitel 4: Anlagen 4.1 bis 4.16.....Seiten 126 bis 141

Zu Kapitel 5: Anlagen 5.1 bis 5.27.....Seiten 142 bis 169

		Rainflow-Matrix Messschrieb																
		NACH																
VON	0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
	0									2	1	1		2	1	2	3	
	1	5		18	69	106	85	59	53	48	20	6	2					
	2	69	602			5	2		1		1			1				
	3	381	826	3		2	3											
	4	651	683	8	2		5	3	3									
	5	672	299	7	2	1		4	2			1	1			1	1	
	6	629	117						6									
	7	714	50	3		2				2		1						
	8	754	19	1	2													
	9	423	3									1						
	10	124																
	11	45																
	12	8																
	13	4																
	14	5																
	15																	

		Rainflow-Matrix Syn_1																
		NACH																
VON	0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
	0					1					10						3	
	1	8			18	59	113	90	70	71	49	21	7					
	2	82	571				4	2		2				3				
	3	419	851	3			5	1				2						
	4	674	648	10	4			5	3	3								
	5	622	298	10	4	1			3	2			2	1			2	1
	6	632	102							3								
	7	716	52	2							4		1					
	8	740	20		1													
	9	405	6										1					
	10	128																
	11	45																
	12	10																
	13	5																
	14	7																
	15																	

		Differenz zum Messschrieb															
		NACH															
VON	0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	0					-1				2	-9	1		2	1	2	
	1	-3			10	-7	-5	-11	-18	-1	-1	-1	2				
	2	-13	31			1			-1		-1			-2			
	3	-38	-25			-3	2										
	4	-23	35	-2	-2												
	5	50	1	-3	-2			1				-1					-1
	6	-3	15						3								
	7	-2	-2	1		2				-2							
	8	14	-1	1	1												
	9	18	-3														
	10	-4															
	11																
	12	-2															
	13	-1															
	14	-2															
	15																

Anlage 4.2 Rainflow-Matrix von Syn_1 und die Differenz zur Rainflow-Matrix des Messschriebs

		Rainflow-Matrix Syn_2															
		NACH															
VON		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	0					2				1	7	1				4	5
	1	14		26	86	135	80	54	74	53	21	6	2				
	2	55	557			5	3		1		1						
	3	377	821	2		1	1										
	4	656	685	4			7	1	3								
	5	703	299	9	1			2								4	
	6	617	114						6								
	7	695	46	1		1				2		2					
	8	752	14	1	2												
	9	432	3														
	10	120															
	11	40															
	12	11															
	13	7															
	14	3															
15																	

		Differenz zum Messschrieb															
		NACH															
VON		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	0					-2				1	-6			2	1	-2	-2
	1	-9		-8	-17	-29	5	5	-21	-5	-1						
	2	14	45				-1							1			
	3	4	5	1		1	2										
	4	-5	-2	4	2		-2	2									
	5	-31		-2	1	1		2	2			1	1			-3	1
	6	12	3														
	7	19	4	2		1						-1					
	8	2	5														
	9	-9										1					
	10	4															
	11	5															
	12	-3															
	13	-3															
	14	2															
	15																

Anlage 4.3 Rainflow-Matrix von Syn_2 und die Differenz zur Rainflow-Matrix des Messschriebs

Rainflow-Matrix Syn_3															
NACH															
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0		1					1		1	3	1	3		2	3
1	5	38	138	235	122	68	45	34	6	1					
2	53	595		6	4	4		1	1						
3	327	800	2	1	6										
4	626	609	10	5	8	3	3	2							
5	699	252	8	1	2	2	1							1	
6	667	75	3		2		6								
7	707	38	1	2	2			1							
8	782	14			1										
9	403	2					1			1					
10	130				1										
11	43	1													
12	7														
13	5														
14	5														
15															

VON

Differenz zum Messschrieb															
NACH															
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0		-1					-1	2		-2	-1	-1			
1		-20	-69	-129	-37	-9	8	14	14	5	2				
2	7			-1	-2	-4	1	-1				1			
3	54	1		1	-3										
4	25	74	-2	-3				-2							
5	-27	47	-1	1	1	2	1			1	1				1
6	-38	42	-3		-2										
7	7	12	2	-1	-2			1		1					
8	-28	5	1	2	-1										
9	20	1					-1								
10	-6				-1										
11	2	-1													
12	1														
13	-1														
14															
15															

VON

Anlage 4.4 Rainflow-Matrix von Syn_3 und die Differenz zur Rainflow-Matrix des Messschriebs

Korrelationstabelle "Messschrieb"

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
5	69	620												
69	620													
381	895	3												
651	789	13	4											
672	384	9	5	6										
629	176			3	4									
714	103	4		5	2	6								
756	67	1	2			2								
424	23	1												
125	6				1		1		1					
45	2				1									
10		1												
5														
7					1									
3					1									
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

NACH

Korrelationstabelle " SYN_1"

VON	1	8														
	2	82	589													
	3	419	910	3												
	4	675	761	14	9											
	5	622	388	12	5	6										
	6	632	172			3	3									
	7	716	123	4		3	2	3								
	8	740	69		1				4							
	9	415	27	2												
	10	128	7				2		1		1					
	11	45					1									
	12	10		3												
	13	5														
	14	7					2									
	15	3					1									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
		NACH														

		Differenz zum Messschrieb														
VON	1	-3														
	2	-13	31													
	3	-38	-15													
	4	-24	28	-1	-5											
	5	50	-4	-3												
	6	-3	4				1									
	7	-2	-20			2		3								
	8	16	-2	1	1				-2							
	9	9	-4	-1												
	10	-3	-1				-1									
	11		2													
	12			-2												
	13															
	14						-1									
	15															
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		NACH														

Korrelationstabelle "SYN_2"

VON	1	14														
	2	55	583													
	3	377	907	2												
	4	658	820	9	1											
	5	703	379	12	2	7										
	6	617	168			1	2									
	7	695	120	2		4		6								
	8	753	67	1	2				2							
	9	439	24	1												
	10	121	6						2							
	11	40	2													
	12	11														
	13	7														
	14	7					4									
	15	5														
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
		NACH														

Differenz zum Messschrieb

1	-9														
2	14	37													
3	4	-12	1												
4	-7	-31	4	3											
5	-31	5	-3	3	-1										
6	12	8			2	2									
7	19	-17	2		1	2									
8	3														
9	-15	-1													
10	4					1		-1		1					
11	5					1									
12	-1		1												
13	-2														
14						-3									
15	-2					1									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

NACH

Korrelationstabelle "SYN_3"

VON	1	5														
	2	54	633													
	3	327	938	2												
	4	626	844	16	6											
	5	699	374	12	7	8										
	6	667	143	7		3	4									
	7	708	83	1	1	5	3	6								
	8	782	48	1		2	1		1							
	9	404	8	1					1							
	10	133	1				1			1						
	11	44	1													
	12	10														
	13	5														
	14	7					1									
	15	3														
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
NACH																

Differenz zum Messschrieb

VON	1														
	2	15	-13												
	3	54	-43	1											
	4	25	-55	-3	-2										
	5	-27	10	-3	-2	-2									
	6	-38	33	-7											
	7	6	20	3	-1		-1								
	8	-26	19		2	-2	-1		1						
	9	20	15						-1						
	10	-8	5						1						
	11	1	1				1								
	12			1											
	13														
	14														
	15						1								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	NACH														

$F_{\max} = 41 \text{ kN} / F_{\min} = 1 \text{ kN}$											
Messschrieb			SYN_1			SYN_2			SYN_3		
Probe Nr.	Durchmesser in mm	N _{rev} Bruch	Probe Nr.	Durchmesser in mm	N _{rev} Bruch	Probe Nr.	Durchmesser in mm	N _{rev} Bruch	Probe Nr.	Durchmesser in mm	N _{rev} Bruch
86	13,966	4.288.580	83	14,000	2.530.519	42	14,000	3.768.071	60	14,011	6.424.975
11	14,004	3.451.472	15	14,000	2.403.438	44	14,005	3.652.405	55	14,008	4.066.241
59	14,011	3.131.706	17	14,000	2.380.912	61	14,000	3.138.018	47	14,000	4.063.515
64	14,000	> 1,9E6	2	14,007	2.340.670	40	14,002	3.136.516	43	14,005	3.985.458
68	14,000	> 1,9E6	14	14,005	2.334.078	74	14,007	2.439.529	53	14,000	3.759.617
76	14,006	> 1,9E6	67	14,008	2.258.971	90	14,001	2.365.262	33	13,997	3.645.556
78	14,010	2.471.848	91	14,007	2.103.834	46	14,011	2.343.283	39	14,010	3.547.976
13	14,004	2.445.588	22	14,003	2.096.514	38	14,000	2.324.591	35	14,002	3.423.892
84	14,001	> 1,9E6	3	14,010	2.072.423	85	13,996	2.195.875	45	14,000	3.314.359
88	14,036	> 1,9E6	29	14,009	2.062.794	65	14,014	2.016.063	57	14,010	3.282.426
7	14,010	1.931.111	6	14,007	1.851.744	34	14,001	1.970.414	51	13,994	3.204.700
72	13,990	1.867.491	12	14,002	1.720.289	81	14,003	1.933.716	37	14,000	3.141.349
24	13,998	1.798.266	19	14,005	1.696.066	32	14,000	1.927.292	41	14,000	3.083.997
92	14,008	1.782.867	27	14,005	1.622.396	52	13,999	1.900.836	70	14,019	2.793.870
28	14,010	1.745.719	75	14,001	1.547.564	77	14,007	1.866.924	31	13,999	2.722.910
80	13,981	1.737.154	9	14,009	1.483.230	36	14,008	1.769.239	49	14,000	2.704.766
16	14,010	1.721.466	21	14,000	1.463.232	82	14,012	1.747.610	87	13,975	2.345.338
20	14,005	1.670.538	25	14,005	1.405.785	89	14,007	1.433.308	71	14,008	2.076.731
18	14,000	1.620.286				73	14,006	1.304.488	63	13,999	1.930.066
62	14,000	1.614.930				69	14,001	1.300.719	66	14,002	1.806.493
30	14,000	1.590.589							79	14,004	1.763.255
10	14,010	1.569.096									
1	14,006	1.494.667									
4	14,000	1.480.741									
5	14,000	1.458.607									
26	14,003	1.456.646									
N _{10%} = 3.059.792			N _{10%} = 2.477.653			N _{10%} = 3.136.238			N _{10%} = 4.548.845		
N _{50%} = 2.026.223			N _{50%} = 1.931.095			N _{50%} = 2.129.961			N _{50%} = 3.048.611		
N _{90%} = 1.341.784			N _{90%} = 1.505.106			N _{90%} = 1.446.553			N _{90%} = 2.043.163		
T _N = 1:2,28			T _N = 1:1,65			T _N = 1:2,17			T _N = 1:2,23		

		ANZAHL ZUSAMMENHÄNGENDER UMKEHRPUNKTE : 2																		Messschrieb	
		A B S T A N D																			
K L A S S E		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0		319		538		279		120		79		49		18		22		9		2
	1		327	1	373	1	241		156		88		73		50	1	31		23		20
	2		67	9	54	3	39	1	44	5	41	4	33	6	29	5	24	4	24	1	19
	3		148	3	128	2	142	4	93	3	70	3	63		58		57	1	45	1	37
	4		200	4	147	6	146	5	115	3	116	1	84	2	57	1	39		55		37
	5		112	3	111	1	86	1	69	1	64	1	87	2	49	2	42	1	36	2	27
	6		63		66		63	1	56		37	1	43	1	36		34		30		34
	7		83	1	66		56		43		57		35		47		30		34	1	25
	8		81		66		70		57		60		32		40		35		33		30
	9		34		26		26		16		25	1	15		10		12		10		14
	10		10		3		1		4		2		3						1		
	11		3		2				1								1				
	12																				
	13																				
	14																				
	15		1				1														

		ANZAHL ZUSAMMENHÄNGENDER UMKEHRPUNKTE : 3																		Messschrieb	
		A B S T A N D																			
K L A S S E		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0		171		107		24		6		5		1		2		1				
	1		131		93		29		9		3		3		2		1				
	2		5		5		4		4		1		3		1		1				
	3		34	1	17		8		10		7		7		3		6		1		2
	4		36		17	1	18		13		9		5		4		3		1		
	5		19		18		11		9	1	4		1		3		1		1		1
	6		7		5		2		7		3		1		1		1		1		1
	7		9		10		9		4		2		3		2		1		3		
	8		2		5		3		4		3		5		1		1		1		2
	9				4		1				2						1				2
	10																				
	11																				
	12																				
	13																				
	14																				
	15																				

		ANZAHL ZUSAMMENHÄNGENDER UMKEHRPUNKTE : 4																		Messschrieb	
		A B S T A N D																			
K L A S S E		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0		93		30		2		2												
	1		89		25		2														
	2		1								1										1
	3		3		5		2		1												
	4		6		3		3		2		1				1						
	5		1		1		2		1		1										
	6		4				3										1				
	7				2				2												
	8		1		1																
	9																				
	10																				
	11																				
	12																				
	13																				
	14																				
	15																				

ANZAHL ZUSAMMENHÄNGENDER UMKEHRPUNKTE : 2																					Syn_1
K L A S S E	A B S T A N D																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
	0		317		527		293		178		94		43		24		11		8		7
	1		356	3	356	3	235	2	182		121	2	84		80	1	42		26		27
	2		56	14	47	5	42	4	40	4	40	1	23	5	38	3	15	2	20	6	18
	3		167	8	155	2	118	1	118	1	87	3	75	1	65	1	47		45		36
	4		189	2	151	4	135	2	120		125	2	75	1	51		56	2	54	1	36
	5		104	3	88	1	87	3	68	1	61	3	60	3	58		40	1	31		32
	6		76		66	1	66		51		38		43		33		40		31		34
	7		84	1	56		72	1	55	1	56		47	1	36	1	38	1	33		24
	8		69		71		61		45		56		42		26		36		39		21
	9		34		26		19		25		20		18		15		10		10		13
	10		13		3		2		2		1		1		1		1		4		2
	11		2																		
	12																				
	13																				
	14																				
15		1																			

ANZAHL ZUSAMMENHÄNGENDER UMKEHRPUNKTE : 3																					Syn_1
K L A S S E	A B S T A N D																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
	0		225		84		28		8												
	1		194		61	1	23	1	16		8		1				1				
	2		7		2				2		5		3				1		1	1	2
	3		29	3	17		6		7		8		5		3		5		2		1
	4		44		24	1	17	2	10		5		4		3		3		1		1
	5		18		14		13		6		9		10		5		2		1		1
	6		6		3		2		6		3		4		4		2				1
	7		13		10		7		4		2				1		1		1		1
	8		10		4		4		4		3						2		3		1
	9		2		2						2				1				1		1
	10		1										1								
	11																				
	12																				
	13																				
	14																				
15																					

ANZAHL ZUSAMMENHÄNGENDER UMKEHRPUNKTE : 4																					Syn_1
K L A S S E	A B S T A N D																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
	0		143		21		2		3												
	1		92		11		7		1				1								
	2		2																		
	3		4		2				2												
	4		8				1		2												
	5		1				1				1										
	6				1						1										
	7				1				2				2								
	8		1																		
	9																				
	10																				
	11																				
	12																				
	13																				
	14																				
15																					

ANZAHL ZUSAMMENHÄNGENDER UMKEHRPUNKTE : 2											Syn_1-Differenz zum Messschrieb										
A B S T A N D																					
K L A S S E		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0		2		11		-14		-58		-15		6		-6		11		1		-5
	1		-29	-2	17	-2	6	-2	-26		-33	-2	-11		-30		-11		-3		-7
	2		11	-5	7	-2	-3	-3	4	1	1	3	10	1	-9	2	9	2	4	-5	1
	3		-19	-5	-27		24	3	-25	2	-17		-12	-1	-7	-1	10	1	1	1	1
	4		11	2	-4	2	11	3	-5	3	-9	-1	9	1	6	1	-17	-2	1	-1	1
	5		8		23		-1	-2	1		3	-2	27	-1	-9	2	2		5	2	-5
	6		-13			-1	-3	1	5		-1	1		1	3		-6		-1		
	7		-1		10		-16	-1	-12	-1	1		-12	-1	11	-1	-8	-1	1	1	1
	8		12		-5		9		12		4		-10		14		-1		-6		9
	9						7		-9		5	1	-3		-5		2				1
	10		-3				-1		2		1		2		-1		-1		-3		-2
	11		1		2				1								1				
	12																				
	13																				
	14																				
	15						1														

ANZAHL ZUSAMMENHÄNGENDER UMKEHRPUNKTE : 3											Syn_1-Differenz zum Messschrieb										
A B S T A N D																					
K L A S S E		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0		-54		23		-4		-2		5		1		2		1				
	1		-63		32	-1	6	-1	-7		-5		2		2						
	2		-2		3		4		2		-4				1				-1	-1	-2
	3		5	-2			2		3		-1		2				1		-1		1
	4		-8		-7		1	-2	3		4		1		1						-1
	5		1		4		-2		3	1	-5		-9		-2		-1				
	6		1		2				1				-3		-3		-1		1		
	7		-4				2						3		1				2		-1
	8		-8		1		-1						5		1		-1		-2		1
	9		-2		2		1								-1		1		-1		1
	10		-1										-1								
	11																				
	12																				
	13																				
	14																				
	15																				

ANZAHL ZUSAMMENHÄNGENDER UMKEHRPUNKTE : 4											Syn_1-Differenz zum Messschrieb										
A B S T A N D																					
K L A S S E		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0		-50		9				-1												
	1		-3		14		-5		-1				-1								
	2		-1								1										1
	3		-1		3		2		-1												
	4		-2		3		2				1				1						
	5				1		1		1												
	6		4		-1		3				-1						1				
	7				1								-2								
	8				1																
	9																				
	10																				
	11																				
	12																				
	13																				
	14																				
	15																				

ANZAHL ZUSAMMENHÄNGENDER UMKEHRPUNKTE : 2																					Syn_2
K L A S S E	A B S T A N D																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
	0	364		511		305		162		90		50		19		19		11		5	
	1	377	2	343	5	264	6	168	1	139		71		52	1	36		26		27	
	2	48	5	42	3	33	3	48	5	30	1	26	1	25	1	27	4	16	3	18	
	3	151	1	138	1	122	3	99	1	84		69	1	60		53		40		38	
	4	179	3	159	6	135	2	120	2	99	1	93	4	65		46	1	55	1	40	
	5	119		115	2	90	2	70		70		66	1	65		43		47		27	
	6	73		65	2	41		51	1	40		33	1	35		39	2	26	1	27	
	7	76	2	69	1	62	1	51		57	1	33		42		24	1	26		24	
	8	81		70		45		53		60		45		38		43		28		30	
	9	31		20		20		27		21		15		13		14		15		13	
	10	11		1				1				1		4		4		1			
	11	1										1									
	12																				
	13																				
	14																				
15																					

ANZAHL ZUSAMMENHÄNGENDER UMKEHRPUNKTE : 3																					Syn_2
K L A S S E	A B S T A N D																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
	0	209		90		36		7		1		1									
	1	173		62		31	1	10		2		3		2							
	2	5		7		1		1				2		1				1		2	
	3	27	1	24		12		6		8		3		4		3		2			
	4	43		25		19		18		12		2		2				1		2	
	5	17		14		10		9		7		4		1		2		3			
	6	4		9		5		3		6		1		3		1		3		2	
	7	10		11		7		4		2		2		1		1		3		1	
	8	6		3		4		6		1		1		2		3				1	
	9	1		2		3		1		2				1				1			
	10	1																			
	11																				
	12																				
	13																				
	14																				
15																					

ANZAHL ZUSAMMENHÄNGENDER UMKEHRPUNKTE : 4																					Syn_2
K L A S S E	A B S T A N D																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
	0	142		23																	
	1	90		17		9		1													
	2	2		1								1									
	3	5		5								1									
	4	9		6		3				1		1									
	5	1				1		2				1				1					
	6	1						1		1				1							
	7	1				1														1	
	8			1		1				1											
	9	1														1					
	10																				
	11																				
	12																				
	13																				
	14																				
15																					

		ANZAHL ZUSAMMENHÄNGENDER UMKEHRPUNKTE : 2										Syn_2-Differenz zum Messschrieb									
		A B S T A N D																			
K L A S S E		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0		-45		27		-26		-42		-11		-1		-1		3		-2		-3
	1		-50	-1	30	-4	-23	-6	-12	-1	-51		2		-2		-5		-3		-7
	2		19	4	12		6	-2	-4		11	3	7	5	4		4	-3	8	-2	1
	3		-3	2	-10	1	20	1	-6	2	-14	3	-6	-1	-2		4	1	5	1	-1
	4		21	1	-12		11	3	-5	1	17		-9	-2	-8	1	-7	-1		-1	-3
	5		-7	3	-4	-1	-4	-1	-1	1	-6	1	21	1	-16	2	-1	1	-11	2	
	6		-10		1	-2	22	1	5	-1	-3	1	10		1		-5	-2	4	-1	7
	7		7	-1	-3	-1	-6	-1	-8			-1	2		5		6	-1	8	1	1
	8				-4		25		4				-13		2		-8		5		
	9		3		6		6		-11		4	1			-3		-2		-5		1
	10		-1		2		1		3		2		2		-4		-4				
	11		2		2				1				-1				1				
	12																				
	13																				
	14																				
	15		1				1														

		ANZAHL ZUSAMMENHÄNGENDER UMKEHRPUNKTE : 3										Syn_2-Differenz zum Messschrieb									
		A B S T A N D																			
K L A S S E		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0		-38		17		-12		-1		4				2		1				
	1		-42		31		-2	-1	-1		1						1				
	2				-2		3		3		1		1				1		-1		-2
	3			7		-7	-4		4		-1		4		-1		3		-1		2
	4			-7		-8	1	-1	-5		-3		3		2		3				-2
	5			2		4		1		1	-3		-3		2		-1		-2		1
	6			3		-4		-3		4	-3				-2				-2		-1
	7			-1		-1		2					1		1						-1
	8			-4		2		-1		-2		2		4		-1		-2		1	1
	9			-1		2		-2		-1					-1		1		-1		2
	10			-1																	
	11																				
	12																				
	13																				
	14																				
	15																				

		ANZAHL ZUSAMMENHÄNGENDER UMKEHRPUNKTE : 4										Syn_2-Differenz zum Messschrieb									
		A B S T A N D																			
K L A S S E		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0		-49		7		2		2												
	1		-1		8		-7		-1												
	2		-1		-1						1		-1								1
	3		-2				2		1				-1								
	4		-3		-3				2				-1		1						
	5				1		1		-1		1		-1				-1				
	6		3				3		-1		-1				-1		1				
	7		-1		2		-1		2												-1
	8		1				-1				-1										
	9		-1														-1				
	10																				
	11																				
	12																				
	13																				
	14																				
	15																				

ANZAHL ZUSAMMENHÄNGENDER UMKEHRPUNKTE : 2																					Syn_3
K L A S S E	A B S T A N D																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
	0	474		652		369		158		73		33		9		6					
	1	444	3	430	1	310	3	198	1	146		91		61		23		22		11	
	2	51	6	50	3	44	7	34	6	43	6	33	5	39	1	24	4	25	1	20	
	3	149	2	147	3	113		91	2	90	2	71	5	69	3	57	2	43		43	
	4	180	3	167	3	147	2	127	1	89	6	76	2	73	2	54		51	2	31	
	5	133	1	107	4	106		78	3	70	1	66	2	53		48	1	39		27	
	6	72	2	60	3	59		59	1	52		49		52		28		29	1	27	
	7	57		54		74		53		37	1	44		34		30		35	1	23	
	8	74		49		74		65		46		44		45		28		35		23	
	9	16		21	1	18		18		9		17		17		9		17		13	
	10	1		3		3				3		4		5				1		3	
	11															1		1		1	
	12																				
	13																				
	14																				
15																					

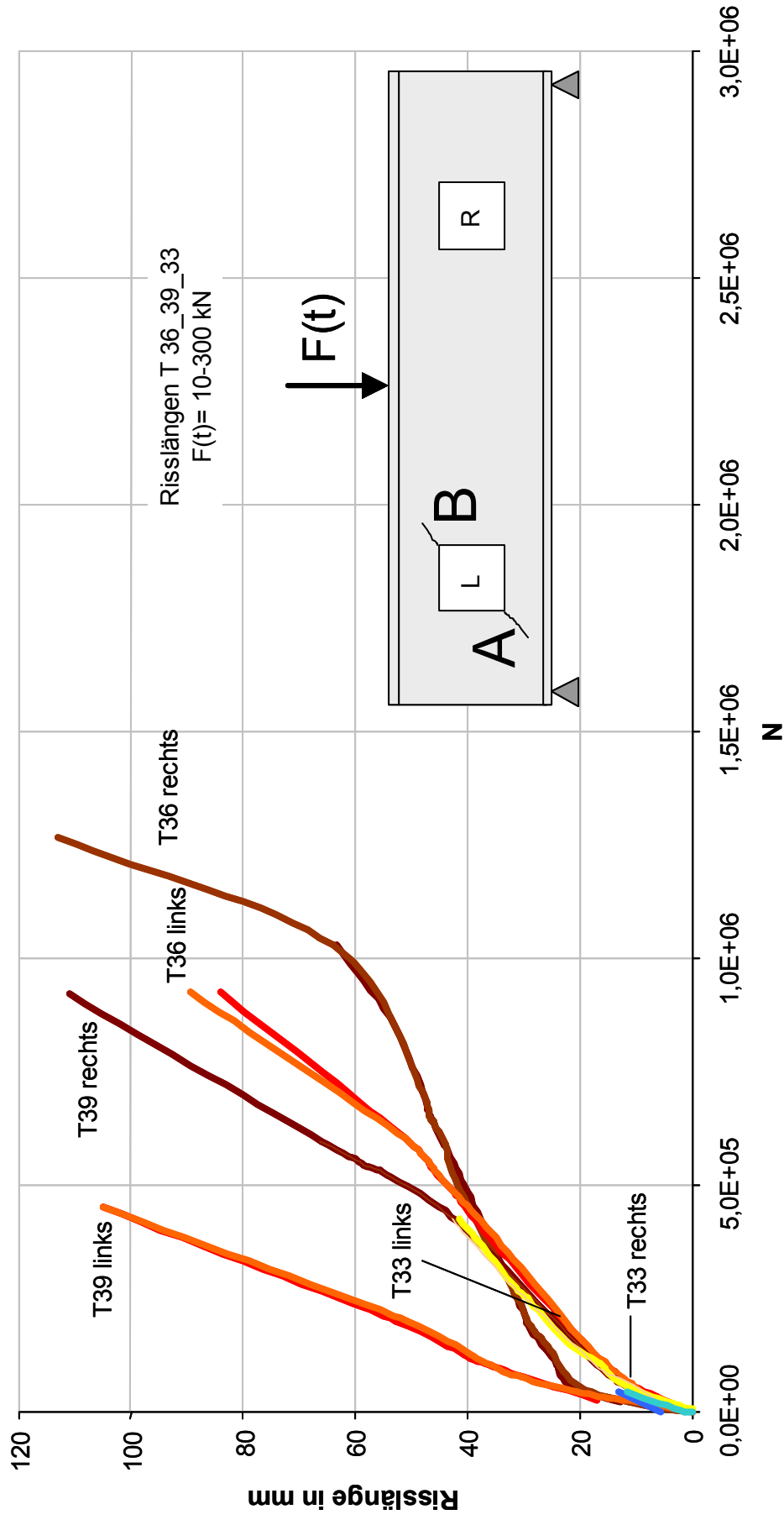
ANZAHL ZUSAMMENHÄNGENDER UMKEHRPUNKTE : 3																					Syn_3
K L A S S E	A B S T A N D																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
	0	245		172		31		7		2											
	1	169		120	1	67		13		7		6									
	2	3	2	2	2	4		2		2		4		4		1				1	
	3	23	1	19		17		7		10		4		5		2		2		1	
	4	35		30	1	30	1	14	2	4		6		2		1					
	5	15	1	13		6		8		4		6		3		2		2			
	6	6		7		5		6		2		3		3						1	
	7	10		6		5		4		2		2		1		1		2			
	8	9		7		1		9		3		3		2		1		3		1	
	9							1		2		2								2	
	10																				
	11																				
	12																				
	13																				
	14																				
15																					

ANZAHL ZUSAMMENHÄNGENDER UMKEHRPUNKTE : 4																					Syn_3
K L A S S E	A B S T A N D																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
	0	153		40		6		1													
	1	71		26		6		1													
	2					1															
	3					2		2		1											
	4		4		3		2		1						2		1				
	5		2		2		1		1				1								
	6		2		2				1		1										
	7		1				1								2				1		
	8						2		1											1	
	9												1								
	10																				
	11																				
	12																				
	13																				
	14																				
15																					

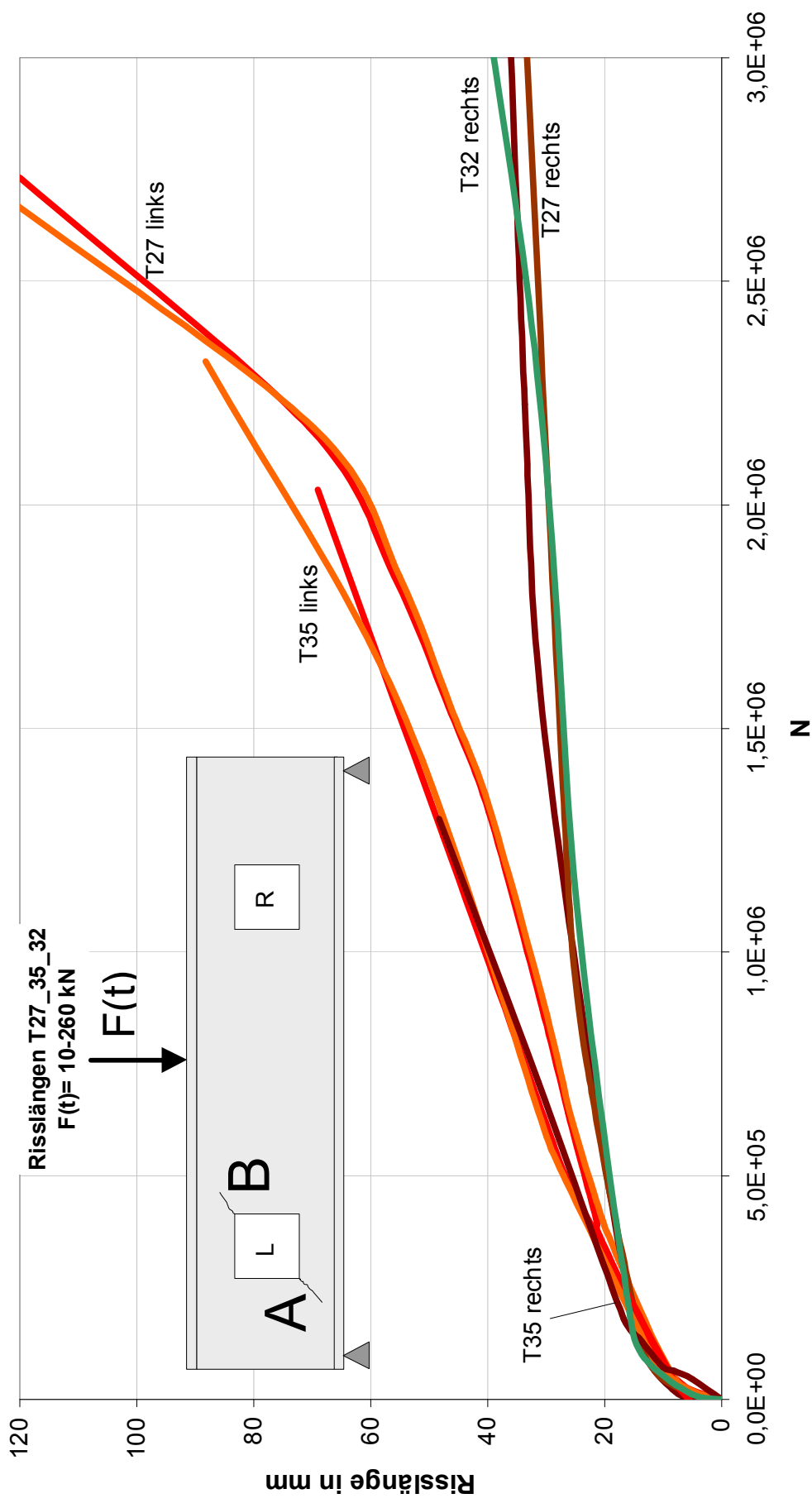
		ANZAHL ZUSAMMENHÄNGENDER UMKEHRPUNKTE : 2										Syn_3-Differenz zum Messschrieb									
		A B S T A N D																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
K L A S S E	0	-155		-114		-90		-38		6		16		9		16		9		2	
	1	-117	-2	-57		-69	-3	-42	-1	-58		-18		-11	1	8		1		9	
	2	16	3	4		-5	-6	10	-1	-2	-2		1	-10	4			-1		-1	
	3	-1	1	-19	-1	29	4	2	1	-20	1	-8	-5	-11	-3		-1	2	1	-6	
	4	20	1	-20	3	-1	3	-12	2	27	-5	8		-16	-1	-15		4	-2	6	
	5	-21	2	4	-3	-20	1	-9	-2	-6		21		-4	2	-6		-3	2		
	6	-9	-2	6	-3	4	1	-3	-1	-15	1	-6	1	-16		6		1	-1	7	
	7	26	1	12		-18		-10		20	-1	-9		13				-1		2	
	8	7		17		-4		-8		14		-12		-5		7		-2		7	
	9	18		5	-1	8		-2		16	1	-2		-7		3		-7		1	
	10	9				-2		4		-1		-1		-5						-3	
	11	3		2				1										-1		-1	
	12																				
	13																				
	14																				
	15	1					1														

		ANZAHL ZUSAMMENHÄNGENDER UMKEHRPUNKTE : 3										Syn_3-Differenz zum Messschrieb									
		A B S T A N D																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
K L A S S E	0	-74		-65		-7		-1		3		1		2		1					
	1	-38		-27	-1	-38		-4		-4		-3		2		1					
	2	2	-2	3	-2		2		-1		-1		-3							-1	
	3	11		-2		-9		3		-3		3		-2		4		-1		1	
	4	1		-13		-12	-1	-1	-2	5		-1		2		2		1			
	5	4	-1	5		5		1	1		-5					-1		-1		1	
	6	1		-2		-3		1		1		-2		-2		1		1			
	7	-1		4		4					1		1		1			1			
	8	-7		-2		2		-5			2		-1					-2		1	
	9			4		1		-1			-2					1					
	10																				
	11																				
	12																				
	13																				
	14																				
	15																				

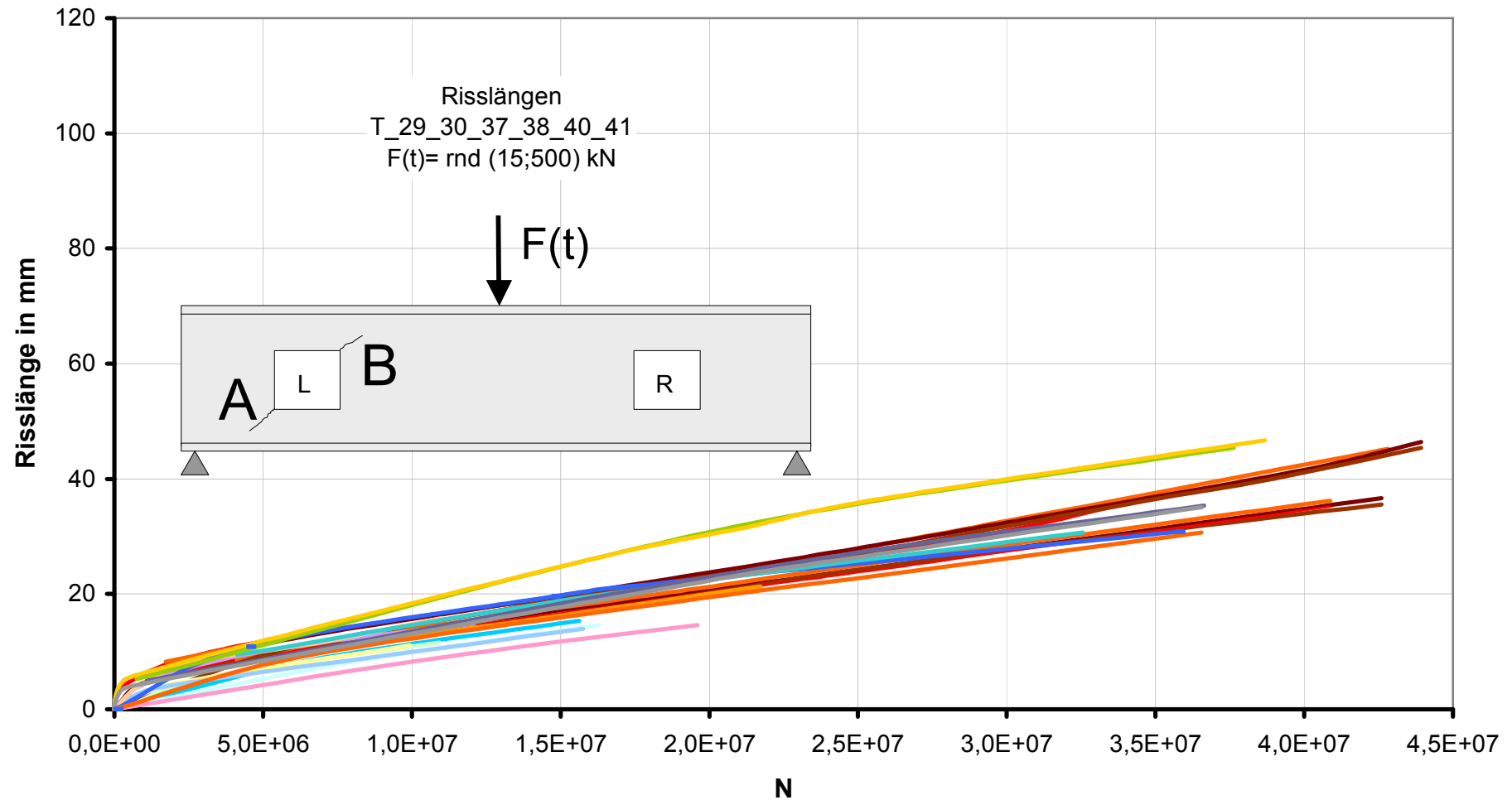
		ANZAHL ZUSAMMENHÄNGENDER UMKEHRPUNKTE : 4										Syn_3-Differenz zum Messschrieb									
		A B S T A N D																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
K L A S S E	0	-60		-10		-4		1													
	1	18		-1		-4		-1													
	2	1				-1				1										1	
	3	3		5				-1		-1											
	4	2				1		1		1				-1		-1					
	5	-1		-1		1				1			-1								
	6	2		-2		3		-1		-1						1					
	7	-1		2		-1		2						-2				-1			
	8	1		1		-2		-1												-1	
	9												-1								
	10																				
	11																				
	12																				
	13																				
	14																				
	15																				



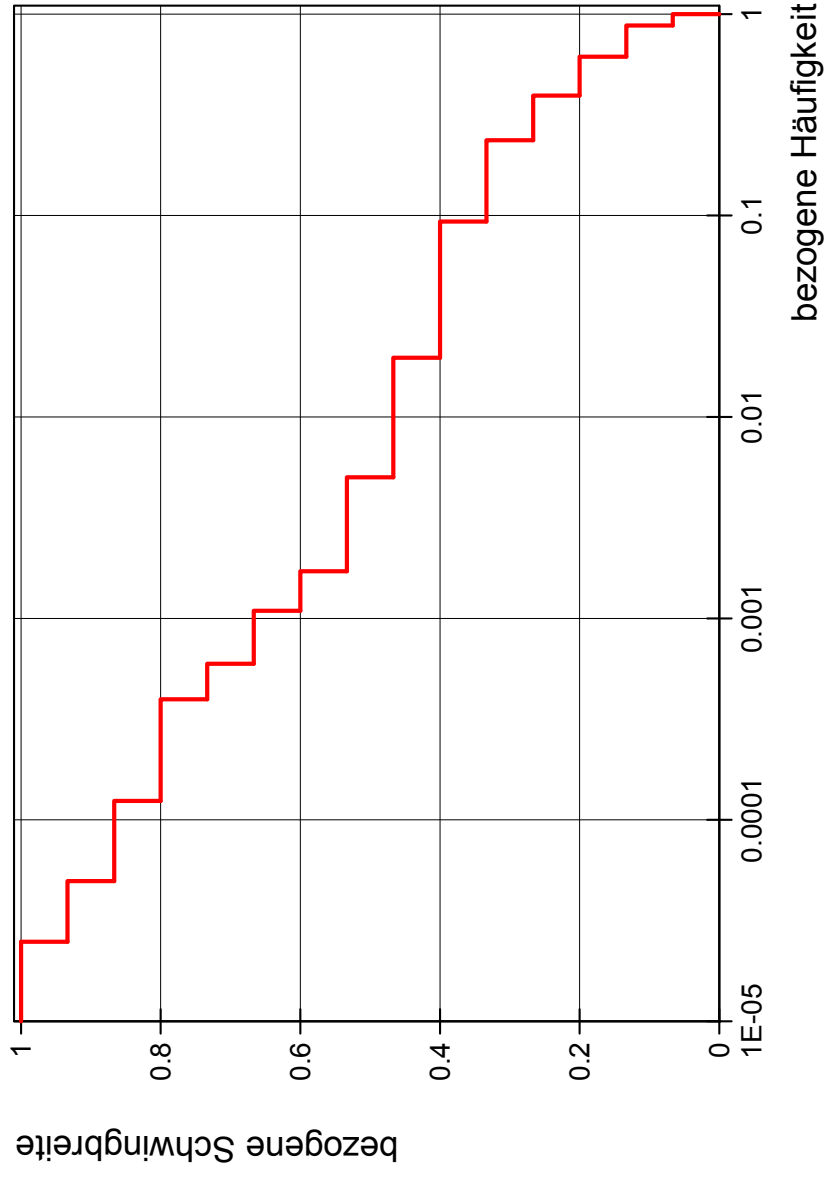
Anlage 5.1 Risswachstumsmessungen beidseits des Steges an der Aussparungsecke A in Versuchsreihe "Wöhler IIb"; Das Risswachstum ist stark abhängig von dem Anriss bzw. dem Rissfortschritt an der Ecke B.



Anlage 5.2 Risswachstumsmessungen beidseits des Steges an der Aussparungsecke A in Versuchsreihe "Wöhler IIa"; Das Risswachstum ist stark abhängig von dem Anriss bzw. dem Rissfortschritt an der Ecke B.



Anlage 5.3 Risswachstumsmessungen beidseits des Steges an der Aussparungsecke A in Versuchsreihe "Random II"; Der Einfluss des Anrisses der Ecke B auf das Risswachstum der Ecke A tritt wegen den hohen Lastwechselzahlen verhältnismäßig geringer in Erscheinung als in Anlagen 5.1 und 5.2 .



	NACH															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
VON	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0																
1	73		71	250	260	254	237	125	19	17	4	4	1			
2	446	1281		214	674	430	524	555	192	35	4	1	1	1	1	
3	1050	3474	2946		92	99	47	20	14		2					
4	918	3785	5474	138		62	27	13	4	2		1				
5	1047	2584	3203	122	19		47	13	2							
6	859	2459	2026	53	4	5		12	2							
7	209	1451	1450	14	1	2	1		5	1						
8	46	305	334	1	4											
9	11	60	19			1										
10	4	9	6			1	1									
11	2	10														
12	8	3	1													
13	3	2	1													
14	1															
15																

Anlage 5.5 Rainflow-Matrix der Beanspruchung einer Woche der Autobahnbrücke BS-Wenden.

Charge		R_{eH}	R_m	A_5
		N/mm ²	N/mm ²	%
I	Zeugnis 3.1B	441	530	29
	Zugversuch	459	530	35
II	Zeugnis 3.1B	405	536	32
	Zugversuch	438	536	31
III	Zeugnis 3.1B	430	549	31
	Zugversuch	484	568	31
IV	Zeugnis 2.2	420	539	32
	Zugversuch	512	552	30
V	Zeugnis 3.1B	402	533	33
	Zugversuch	432	553	35
Steifen- blech	Zeugnis 3.1B	362	530	30
	Zugversuch	-	-	-

Charge		C %	Si %	Mn %	P %	S %	N %	Al %	V %	Nb %	Ti %	Cu %	Cr %	Ni %	Mo %
I	Schmelzenanalyse*	0,200	0,550	1,600	0,035	0,035	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	Stückanalyse *	0,230	0,600	1,700	0,045	0,045	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	Schmelzenanalyse	0,110	0,190	1,510	0,012	0,002	0,005	0,040	0,040	0,010	0,000	0,020	0,030	0,040	0,010
	Stückanalyse (EDX)	n.b.	0,510	1,770	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	0,180	n.b.	n.b.
II	Schmelzenanalyse	0,120	0,200	1,530	0,015	0,001	0,007	0,023	0,050	0,010	0,000	0,010	0,030	0,030	0,000
	Stückanalyse (EDX)	n.b.	0,620	1,690	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	0,140	n.b.	n.b.
III	Schmelzenanalyse	0,110	0,200	1,500	0,150	0,004	0,004	0,030	0,050	0,010	0,000	0,060	0,050	0,040	0,010
	Stückanalyse (EDX)	n.b.	0,330	1,790	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	0,080	n.b.	n.b.
IV	Schmelzenanalyse	0,110	0,200	1,460	0,014	0,003	0,008	0,029	0,040	0,010	0,000	0,060	0,050	0,040	0,010
	Stückanalyse (EDX)	n.b.	0,510	1,650	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	0,100	n.b.	n.b.
V	Schmelzenanalyse	0,110	0,430	1,530	0,014	0,005	0,005	0,029	0,041	0,010	0,000	0,010	0,090	0,055	0,010
	Stückanalyse (EDX)	n.b.	1,020	1,700	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	0,160	n.b.	n.b.
Steifen- blech	Schmelzenanalyse	0,180	0,010	1,570	0,015	0,004	0,004	0,034	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	Stückanalyse (EDX)	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

* = Obere Grenzwerte in Gew.-% nach DIN EN 10025

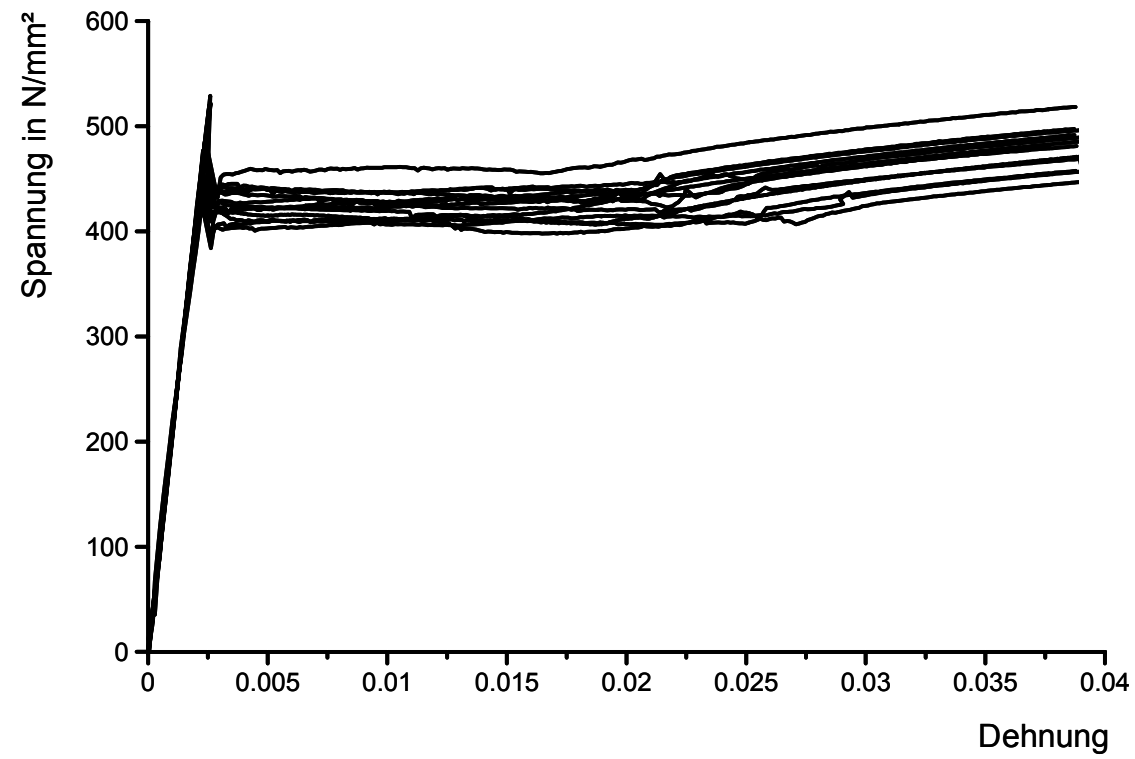
EDX = **E**nergy **D**ispersive **X**-Ray-Analysis

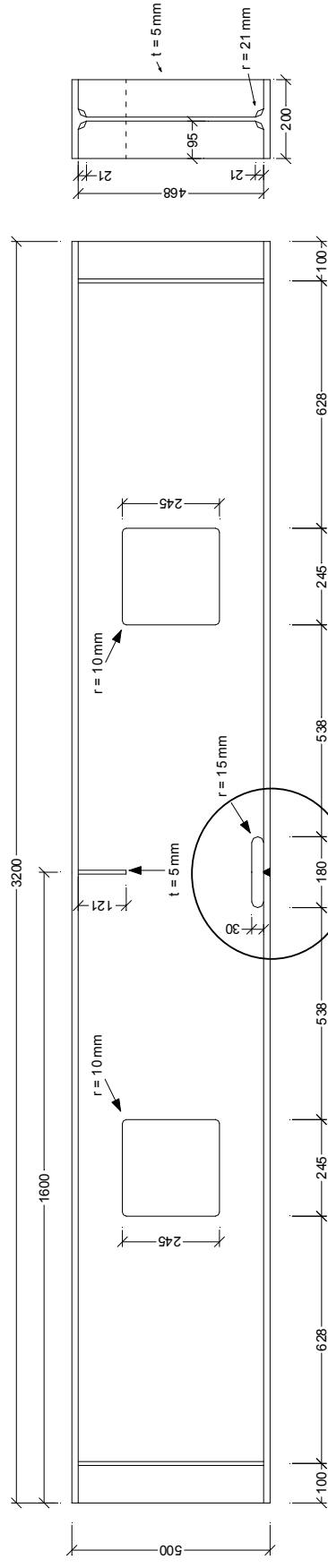
k.A. = keine Angabe

n.b.= nicht bestimmt

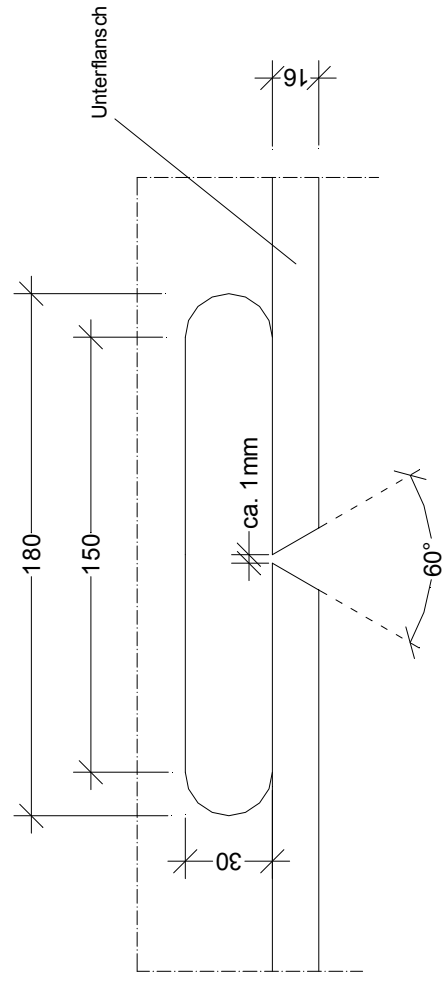
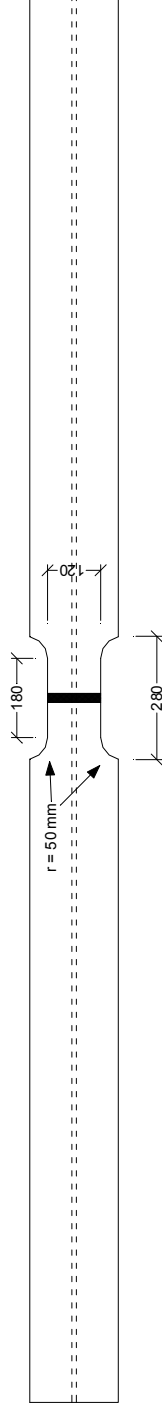
Die Unterschiede zwischen den durch die Schmelz- bzw. Stückanalyse bestimmten Elementanteilen sind z.T. generell immer vorhanden und z.T. auf das angewandte EDX-Verfahren zurückzuführen, welches nur das Ergebnis der Analyse eines einzigen Punktes der Werkstoffoberfläche liefert

Anlage 5.7 Chemische Kennwerte verwendeter Werkstoffe

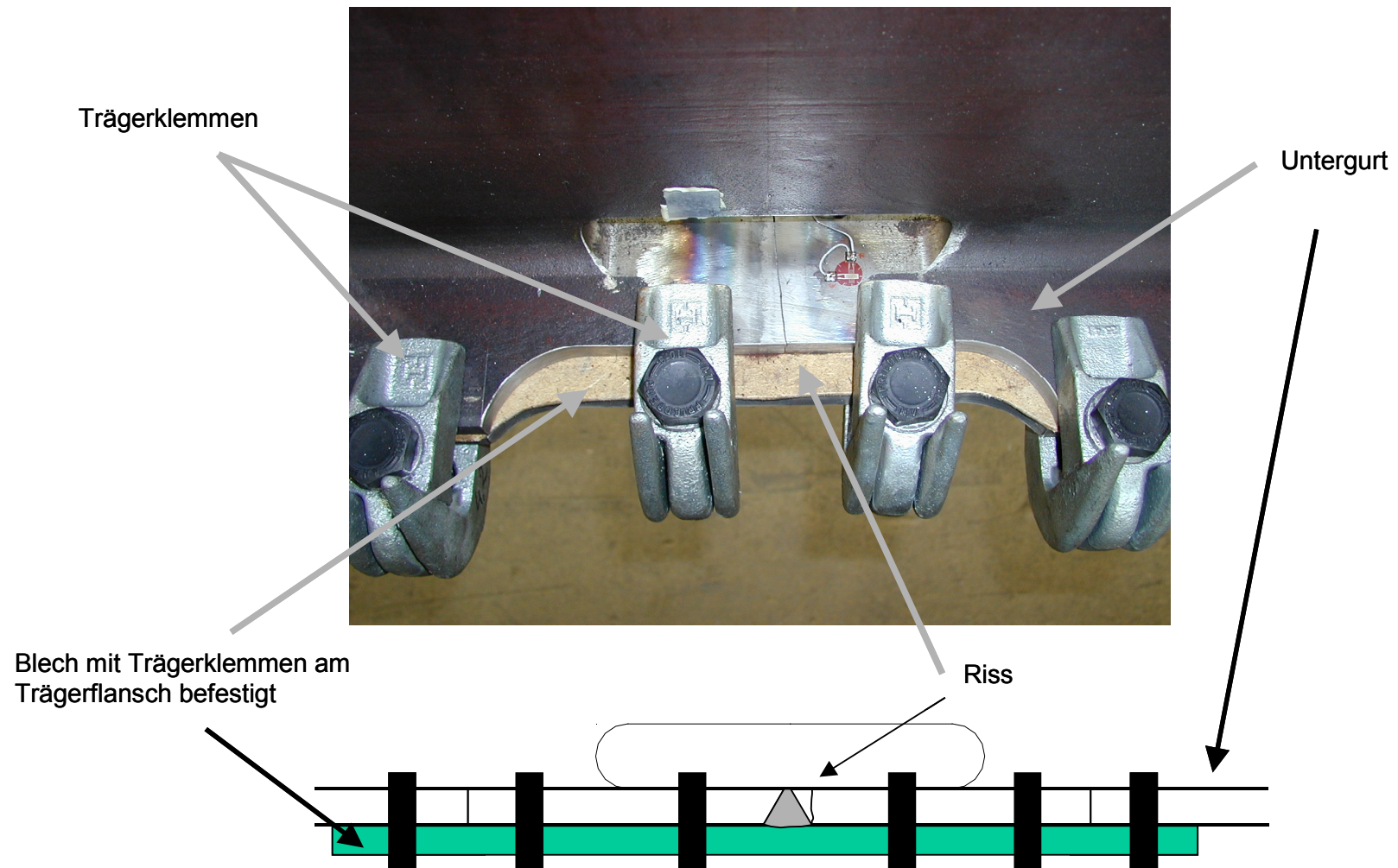


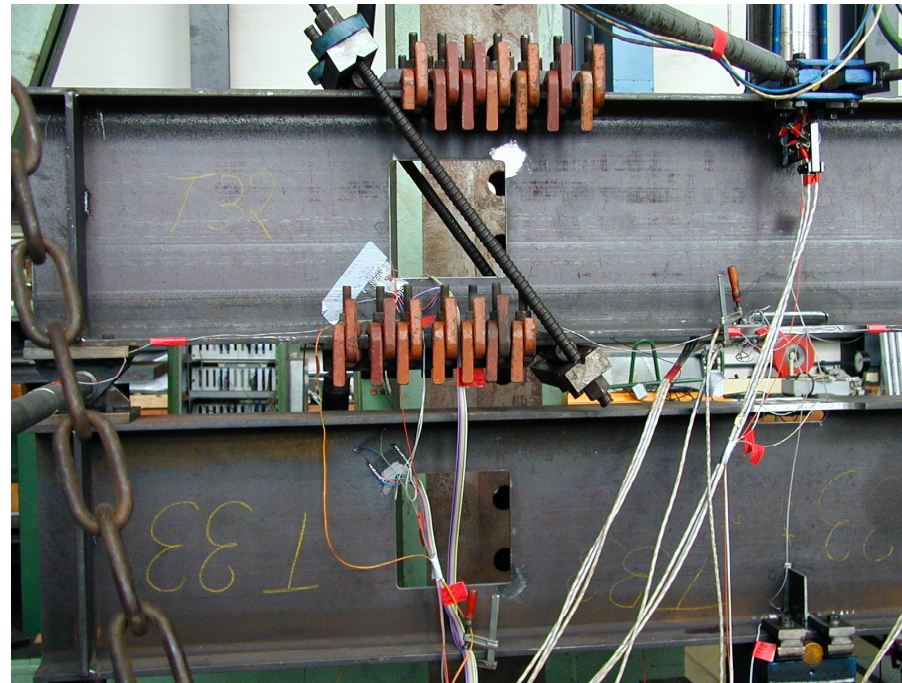


Detail A



Detail A
Nahtvorbereitung

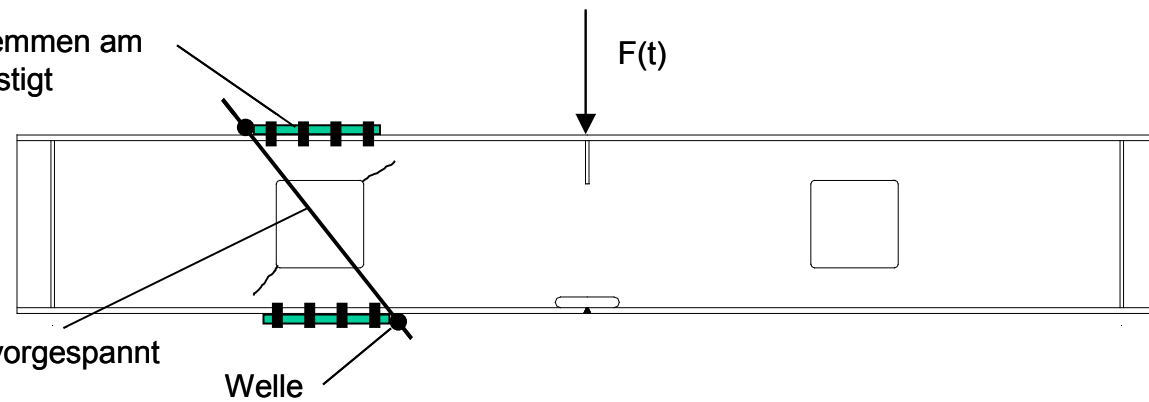




Blech mit Trägerklemmen am
Trägerflansch befestigt

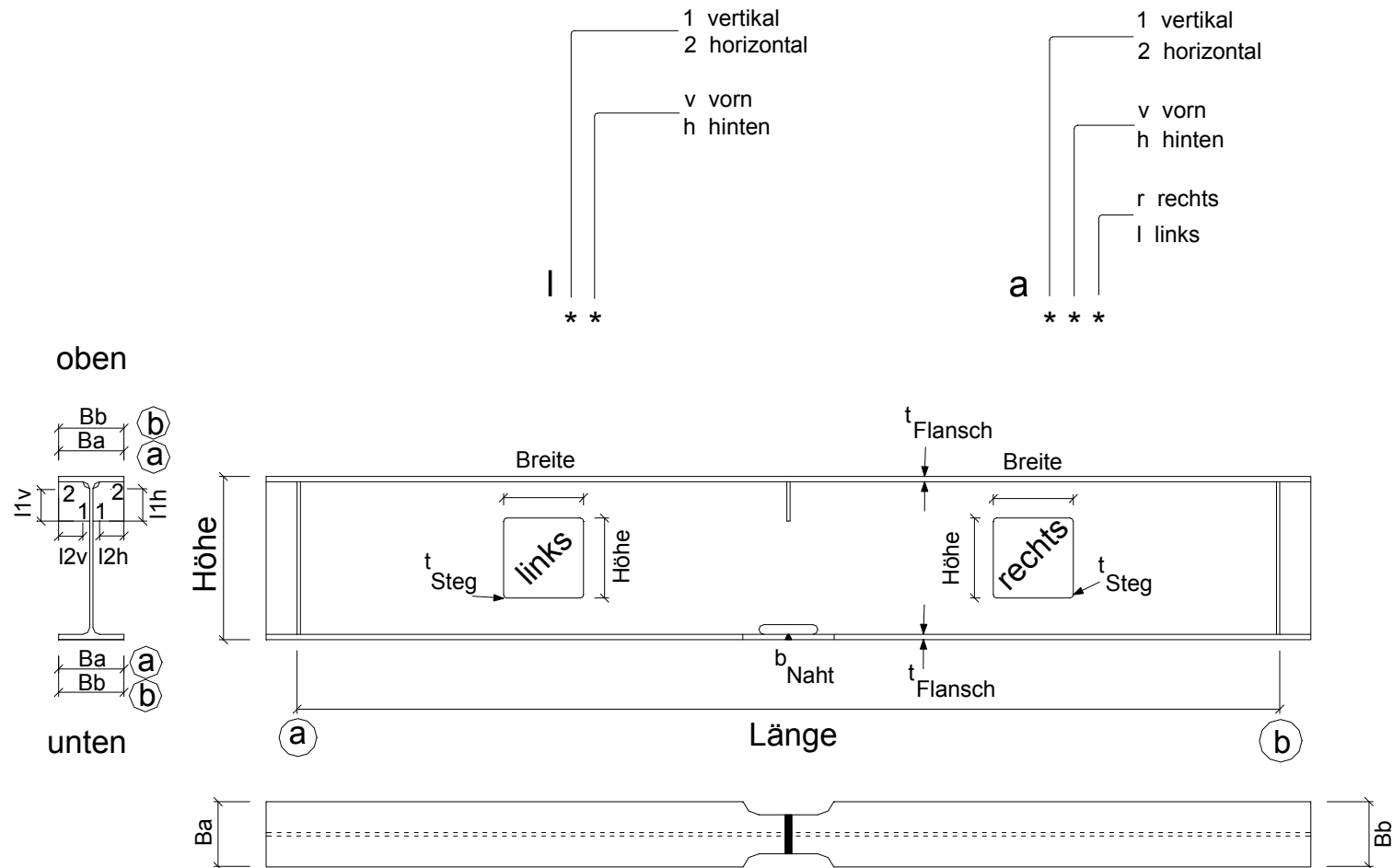
Spannstahl vorgespannt

Welle



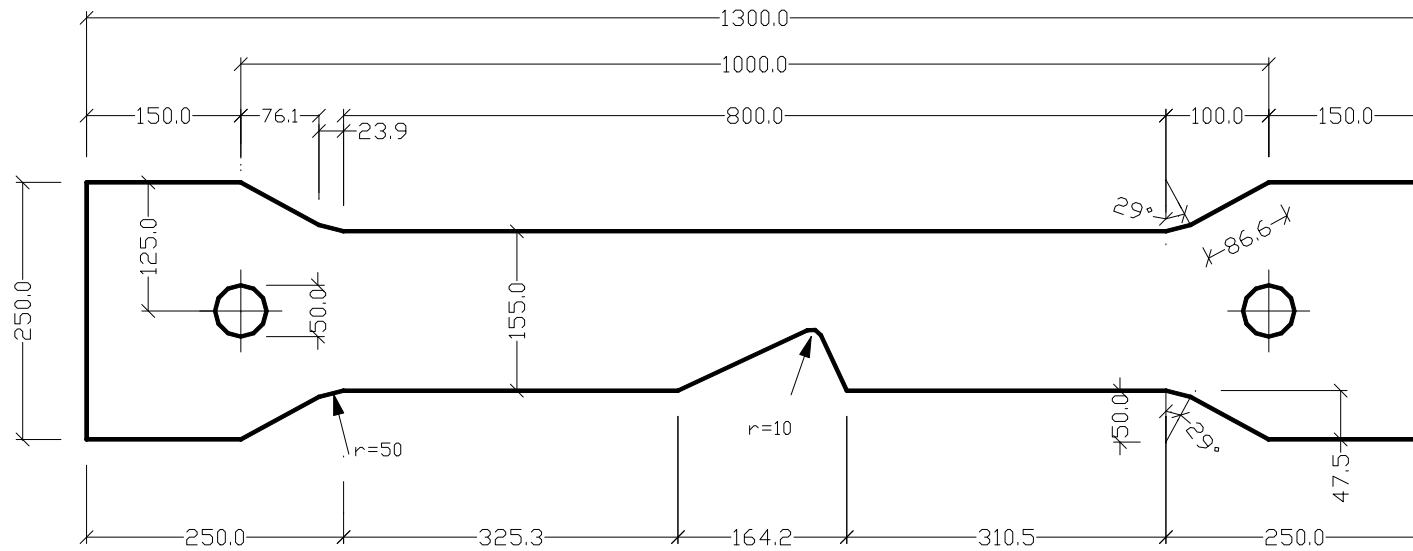
Schweißnahtlänge l:

Schweißnahtdicke a:



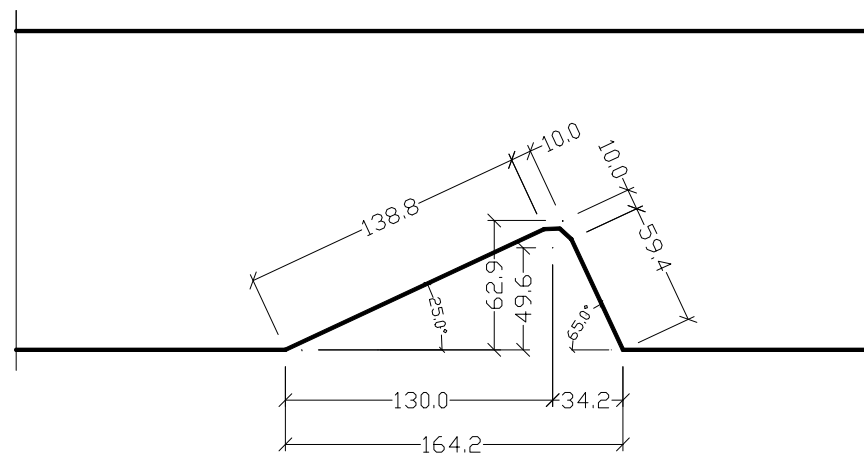
T Nr.	Fenster links			Fenster rechts			Flansch oben			Flansch unten			Breite Naht	Spann- weite	Träger- höhe	Schweißnahtlängen											
	Fl			Fr												vorn						hinten					
	Breite	Höhe	t Steg	Breite	Höhe	t Steg	t	Ba	Bb	t	Ba	Bb	b Naht			l1v	l2v	a1vr	a2vr	a1vl	a2vl	l1h	l2h	a1hr	a2hr	a1hl	a2hl
12	299,8	300,0	10,64	300,3	299,8	10,64	16,57	199,8	199,6	16,52	199,7	199,7	X	2499	500,0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
13	299,5	300,5	10,69	299,5	300,0	10,57	15,20	199,7	199,6	15,88	199,7	199,6	X	2497	500,0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
14	299,8	300,0	10,80	300,0	300,0	10,80	15,40	199,7	199,7	16,40	199,9	199,8	X	2499	499,0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
15	300,0	300,3	10,80	300,0	300,0	10,60	15,30	199,6	199,7	16,50	199,7	199,9	X	2498	500,0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
16	299,0	301,0	10,20	299,5	300,0	10,20	15,20	199,8	X	15,40	199,5	X	X	2500	505,0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
17	299,0	301,5	10,20	299,5	300,5	10,20	15,10	200,0	X	15,50	199,8	X	X	2500	505,0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
18	299,5	299,5	10,20	299,5	300,0	10,20	15,10	199,8	X	15,40	200,0	X	X	2500	505,0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
19	299,0	300,5	10,20	299,5	301,0	10,20	15,50	199,8	X	15,80	200,0	X	X	2500	504,0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
20	99,7	100,2	10,20	100,5	100,4	10,20	15,50	199,5	X	15,20	199,5	X	200,0	3000	500,6	100,0	74,0	3,8	4,8	4,0	5,0	99,0	75,0	3,9	3,5	4,4	4,9
21	100,5	100,4	10,20	100,2	100,0	10,30	15,00	199,7	X	15,40	199,7	X	200,0	3000	500,6	99,0	73,0	3,6	3,2	3,5	4,8	99,0	74,0	3,8	4,8	4,3	3,5
22	180,3	182,0	10,40	180,5	180,8	10,50	15,40	199,2	X	15,60	199,2	X	100,0	3000	500,0	99,0	73,0	3,5	4,2	3,6	3,5	99,0	74,0	3,8	3,6	3,8	4,5
23	101,3	100,0	10,40	100,0	100,3	10,60	15,30	199,2	X	15,50	199,2	X	200,0	2997	500,1	99,0	74,0	3,0	4,0	4,0	4,2	100,0	74,0	4,0	3,5	3,3	4,0
24	99,8	100,2	10,40	100,0	101,5	10,40	15,20	199,4	X	15,70	199,4	X	200,0	3000	501,0	100,0	74,0	3,5	3,6	3,8	4,5	99,0	74,0	3,0	4,0	3,5	4,1
25	179,6	180,5	10,40	180,2	180,8	10,40	15,10	199,5	X	15,60	199,5	X	100,0	3000	501,0	99,0	74,0	3,8	3,3	3,5	4,3	99,0	75,0	3,7	3,6	3,0	3,4
26	245,0	245,0	10,50	245,0	245,0	10,30	15,40	194,0	198,0	15,60	194,0	196,0	120,0	3000	500,0	99,0	74,0	4,9	5,2	4,9	5,2	98,5	74,0	5,5	4,8	5,7	5,4
27	245,0	245,5	10,50	245,0	245,2	10,60	15,50	199,0	199,0	15,60	199,2	199,4	120,0	3000	501,0	99,5	76,0	4,7	5,4	4,4	5,2	99,0	74,0	5,5	5,3	4,9	5,7
28	269,8	272,0	10,60	269,5	269,5	10,60	15,30	199,0	199,0	15,50	199,5	199,5	120,1	3000	500,0	98,5	75,5	4,9	5,5	5,4	5,8	98,5	75,0	4,9	4,9	5,0	5,4

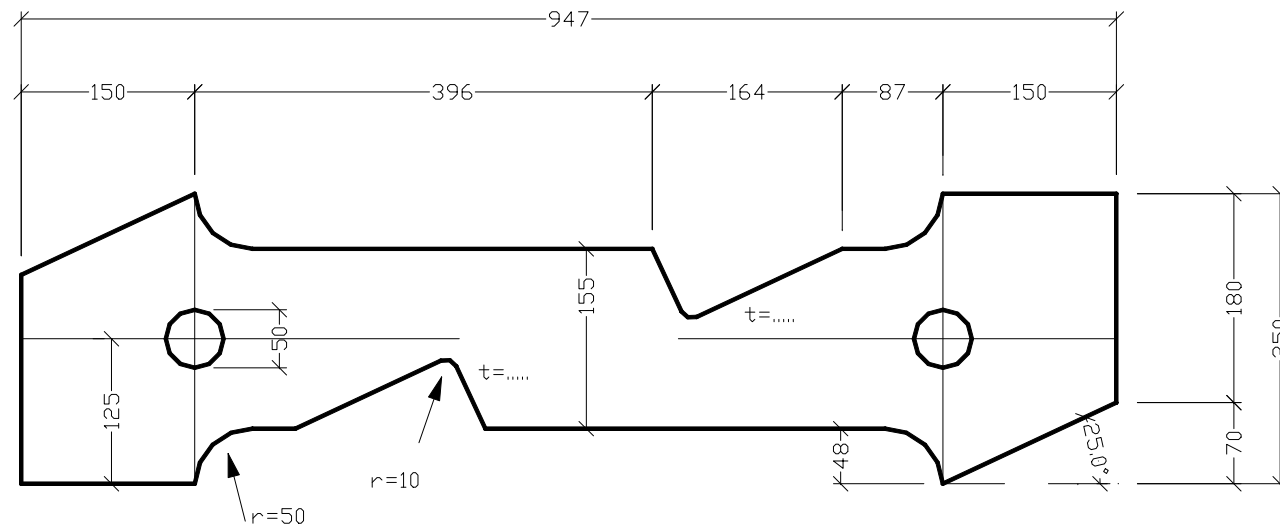
T Nr.	Fenster links			Fenster rechts			Flansch oben			Flansch unten			Breite Naht	Spann- weite	Träger- höhe	Schweißnahtlängen											
	Fl			Fr												vorn						hinten					
	Breite	Höhe	t Steg	Breite	Höhe	t Steg	t	Ba	Bb	t	Ba	Bb	b Naht			l1v	l2v	a1vr	a2vr	a1vl	a2vl	l1h	l2h	a1hr	a2hr	a1hl	a2hl
29	244,8	245,4	10,40	245,0	244,9	10,50	15,50	199,2	199,2	15,50	199,2	199,2	120,0	3000	500,0	99,0	74,5	5,8	5,4	5,2	6,0	99,0	75,5	5,2	4,8	5,4	5,5
30	245,2	245,2	10,30	245,0	244,7	10,30	15,50	199,2	199,2	15,40	199,4	199,4	120,0	3000	504,0	98,5	74,0	4,2	4,8	4,7	5,2	98,5	73,5	4,7	4,4	5,2	4,6
31	269,8	270,8	10,50	270,0	271,3	10,30	15,50	199,3	199,4	15,30	199,3	199,4	120,0	3000	500,0	99,5	75,5	4,7	5,0	4,2	4,7	99,0	73,8	4,5	4,7	4,2	4,5
32	245,0	245,0	10,50	245,0	245,5	10,50	15,70	200,0	200,0	15,90	200,0	200,0	120,0	3000	504,0	100,0	75,0	5,3	4,7	4,4	5,5	100,0	75,0	5,5	4,7	4,6	4,9
33	244,5	245,0	10,50	245,0	244,5	10,50	15,60	200,0	200,0	15,90	200,0	200,0	120,0	3000	504,0	101,0	75,0	5,2	4,9	4,3	5,2	101,0	75,5	4,8	5,2	5,3	5,2
34	244,9	245,0	10,50	245,5	244,5	10,50	15,70	200,0	200,0	15,00	200,0	200,0	120,0	3000	504,0	101,0	75,0	4,8	4,8	5,0	5,7	100,0	76,0	5,0	5,4	5,0	5,3
35	245,0	245,3	10,50	245,5	245,5	10,50	15,00	200,0	200,0	15,90	200,0	200,0	120,0	3000	504,0	100,5	76,0	4,8	4,6	4,3	5,0	99,5	75,0	4,2	4,8	5,1	4,3
36	245,0	245,8	10,51	244,5	245,0	10,49	14,99	200,0	200,0	15,99	200,0	200,0	100,0	3000	504,0	106,0	75,0	4,9	4,6	4,3	4,3	105,0	75,0	4,9	4,9	4,6	4,3
37	244,8	244,9	10,58	245,2	245,8	10,58	15,36	200,0	200,1	15,36	199,9	200,4	100,0	3000	504,0	99,0	75,0	4,2	4,3	4,5	4,4	100,0	74,5	4,2	4,2	4,3	4,3
38	244,7	244,7	10,30	244,8	247,0	10,32	15,45	199,2	199,5	15,33	199,4	199,0	100,0	3000	500,0	100,0	75,0	4,2	4,1	4,6	4,2	100,0	75,0	4,6	4,4	4,9	4,3
39	244,5	245,0	10,50	244,8	245,6	10,43	15,24	199,9	200,0	15,39	200,1	200,0	100,0	3000	504,0	101,0	75,0	5,0	4,6	4,2	4,8	101,0	74,5	4,9	4,8	4,5	4,8
40	244,9	244,7	10,46	245,7	245,5	10,37	15,20	200,0	200,0	15,40	200,0	200,0	100,0	3000	504,0	115,0	75,0	5,0	4,9	5,3	4,9	110,0	75,0	5,0	5,2	4,7	5,0
41	244,5	244,8	10,55	245,3	245,8	10,54	14,75	200,0	200,0	16,04	200,0	200,0	100,0	3000	504,0	115,0	75,0	4,5	4,9	4,8	4,9	115,0	75,0	5,0	4,8	5,0	4,6
42	244,8	245,8	10,21	245,0	246,0	10,16	15,89	200,0	201,0	16,00	200,0	201,0	100,0	3000	502,0	110,0	75,0	4,2	4,8	4,3	5,0	110,0	75,0	4,5	4,9	4,2	5,3
43	244,5	245,3	10,15	244,7	245,2	10,19	15,96	200,0	201,0	15,85	200,0	201,0	100,0	3000	502,0	110,0	75,0	4,1	4,6	5,0	5,0	110,0	75,0	4,0	5,0	4,1	4,6
44	in Vorbereitung																										
45																											
46	244,7	245,5	10,20	244,3	246,0	10,17	16,28	200,5	200,5	15,64	200,5	200,5	100,0	3000	502,0	110,0	75,0	4,5	4,7	4,4	5,0	110,0	75,0	4,9	4,9	5,0	4,7
47	244,5	245,5	10,24	245,3	245,5	10,39	16,57	200,5	200,5	15,75	200,5	200,5	100,0	3000	502,0	110,0	75,0	4,4	4,9	4,2	5,2	110,0	75,0	4,3	4,7	4,9	5,1



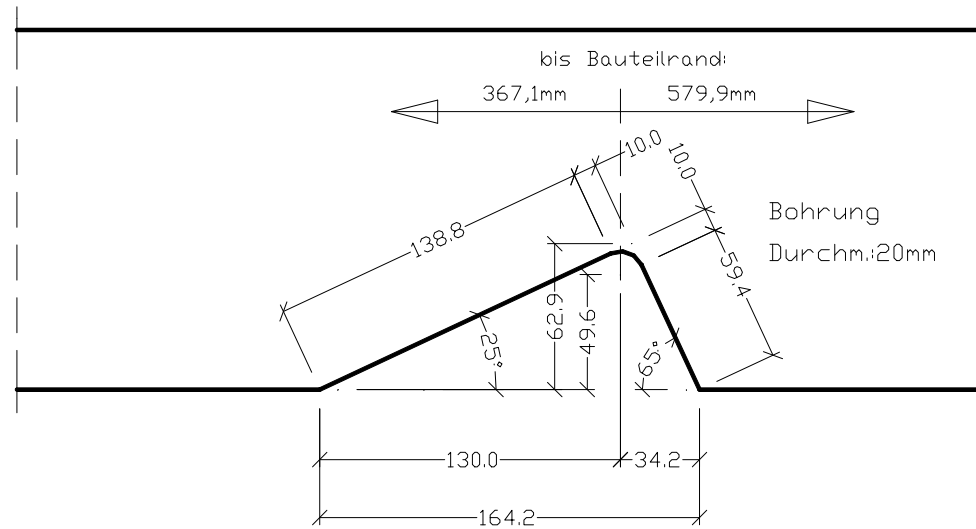
$t=10.2\text{mm}$

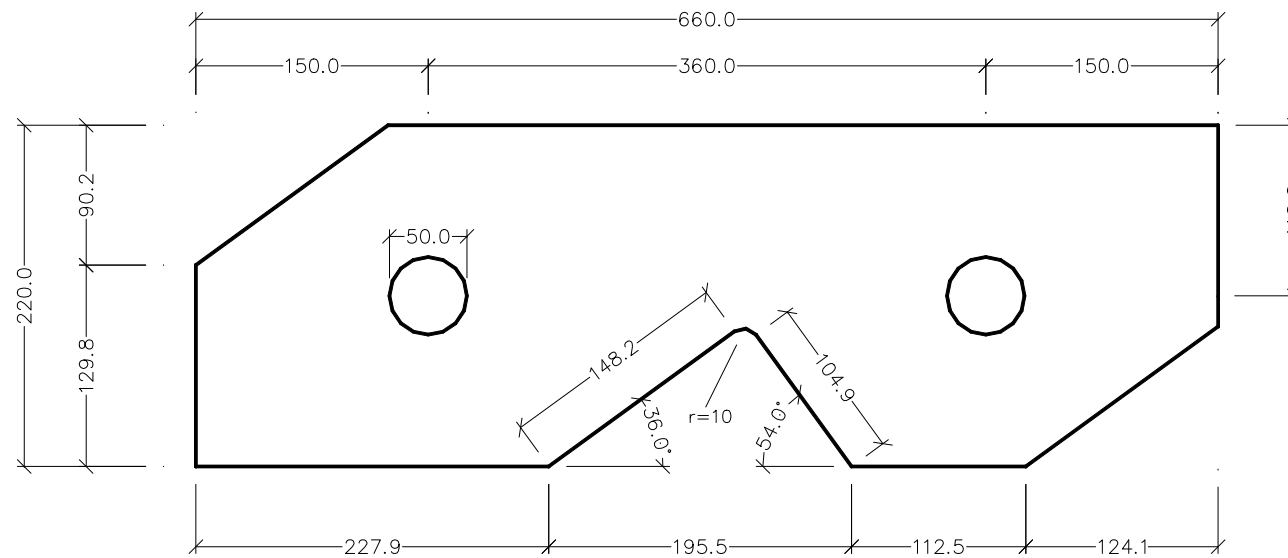
Detail Kerbe:





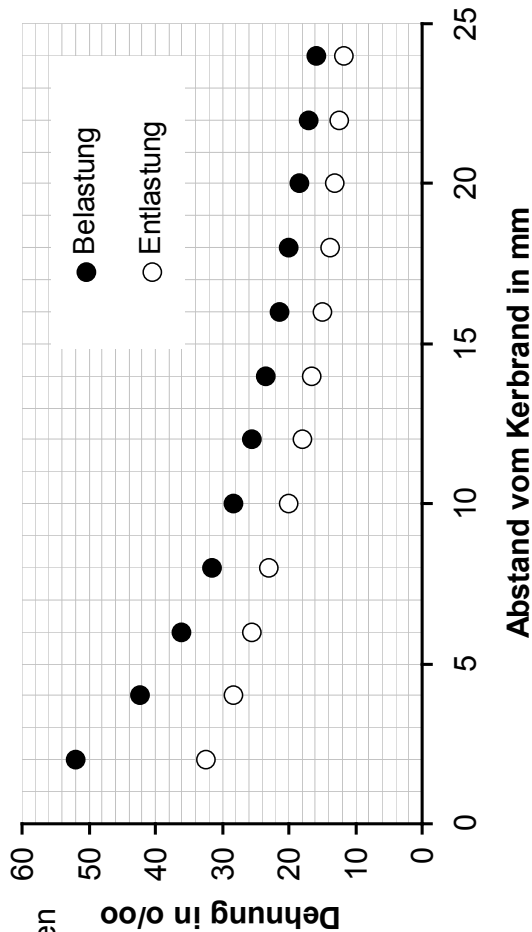
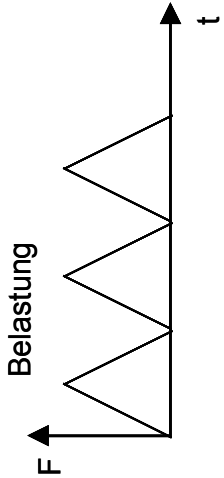
Detail Kerbe:





Anlage 5.16 Probe für die Aussparungsecken. Versuchsreihen: Wöhler IIa, Wöhler IIb und Random II

im ersten Lastwechsel
gemessene Dehnungen



BAUWERK			
$F_o = 0 \text{ kN} / F_u = - 550 \text{ kN}$			
Träger Nr. (Charge)	Blechdicke in mm	N	

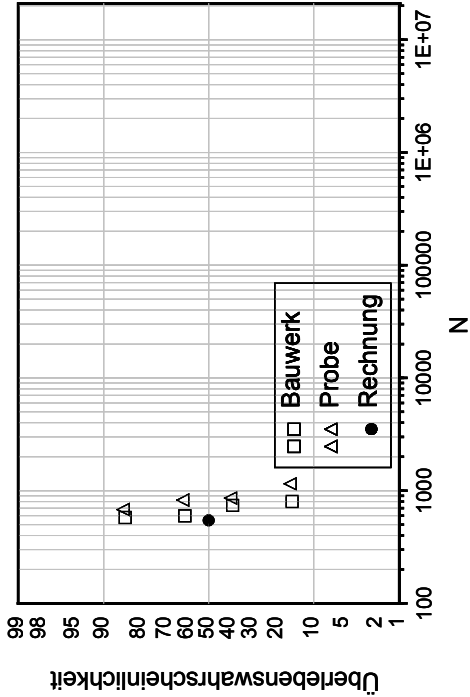
T13(V)	10,7	801	
T13(V)	10,6	740	
T12(V)	10,6	598	
T12(V)	10,6	578	

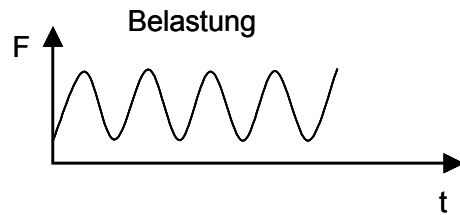
$N_{10\%} = 825$
 $N_{50\%} = 673$
 $N_{90\%} = 548$
 $T_N = 1 : 1,51$

PROBE			
$F_o = 305 \text{ kN} / F_u = - 40 \text{ kN}$			
Probe (Charge)	Blechdicke in mm	N	

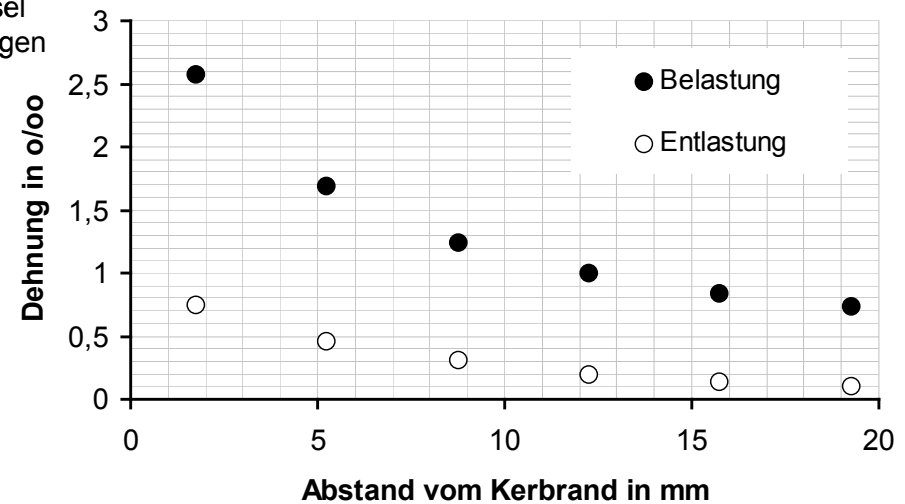
G2(V)	10,6	1.150	
B2(V)	10,7	860	
A2(V)	10,7	825	
C1(V)	10,6	680	

$N_{10\%} = 1.139$
 $N_{50\%} = 863$
 $N_{90\%} = 654$
 $T_N = 1 : 1,74$





im ersten Lastwechsel
gemessene Dehnungen



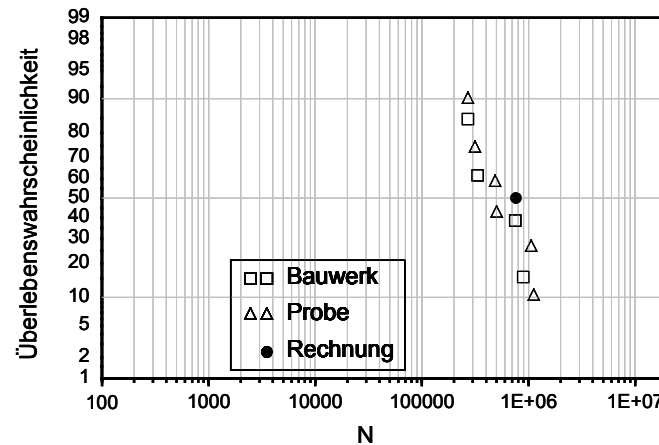
BAUWERK		
$F_o = -5 \text{ kN} / F_u = -105 \text{ kN}$		
Träger Nr. (Charge)	Blechdicke in mm	N Anriss
T17(I)	10,2	270.402
T18(I)	10,2	333.500
T17(I)	10,2	750.400
T18(I)	10,2	889.900

$$N_{10\%} = 1.052.041$$

$$N_{50\%} = 495.376$$

$$N_{90\%} = 233.258$$

$$T_N = 1 : 4,51$$



PROBE		
$F_o = 98 \text{ kN} / F_u = 15 \text{ kN}$		
Probe (Charge)	Blechdicke in mm	N Anriss
E5(I)	10,0	270.377
E5(I)	10,0	314.599
E3(I)	10,0	485.700
E3(I)	10,1	502.000
E4(I)	10,1	1.058.600
E4(I)	10,1	1.118.511

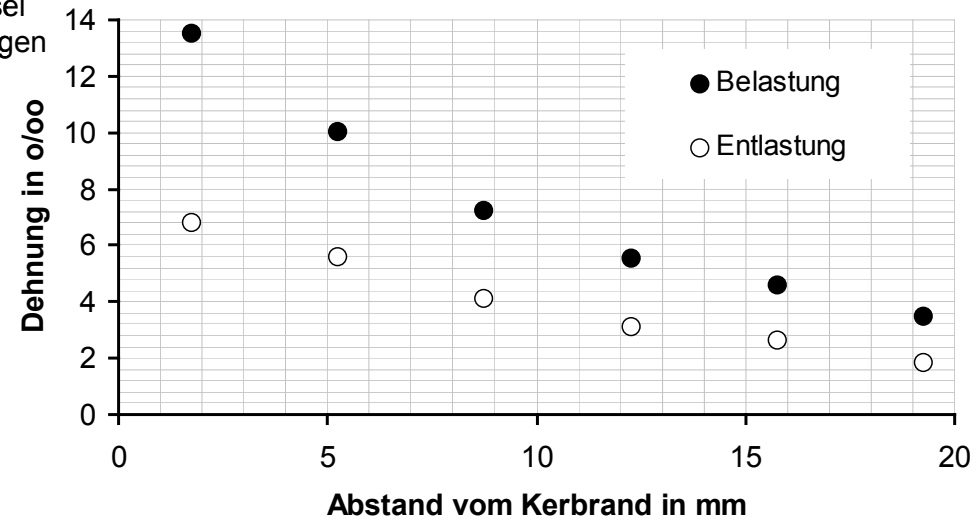
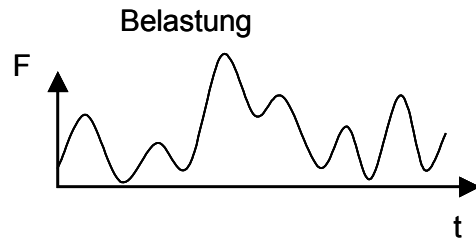
$$N_{10\%} = 1.154.706$$

$$N_{50\%} = 539.132$$

$$N_{90\%} = 251.721$$

$$T_N = 1 : 4,59$$

im ersten Lastwechsel
gemessene Dehnungen



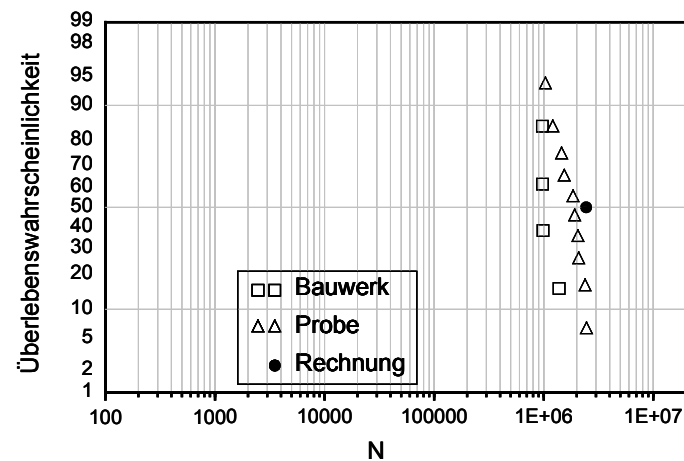
BAUWERK		
$F_{\max} = -15 \text{ kN} / F_{\min} = -300 \text{ kN}$		
Träger Nr. (Charge)	Blechdicke in mm	N_{rev} Anriss
T19(I)	10,2	1.379.861
T16(I)	10,2	983.533
T16(I)	10,2	975.333
T19(I)	10,2	972.233

$$N_{10\%} = 1.328.560$$

$$N_{50\%} = 1.065.091$$

$$N_{90\%} = 853.872$$

$$T_N = 1 : 1,56$$



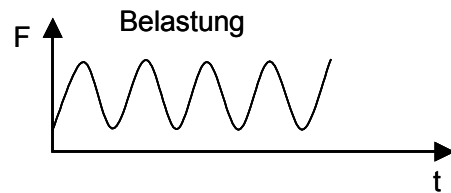
PROBE		
$F_{\max} = 195 \text{ kN} / F_{\min} = -20 \text{ kN}$		
Probe (Charge)	Blechdicke in mm	N_{rev} Anriss
F3(I)	10,0	2.455.360
F4(I)	10,0	2.388.124
F5(I)	10,0	2.085.177
F2(I)	10,0	2.052.053
F4(I)	10,0	1.916.186
F1(I)	10,0	1.849.982
F3(I)	10,0	1.538.346
F5(I)	10,0	1.456.130
F2(I)	10,0	1.211.530
F1(I)	10,1	1.035.062

$$N_{10\%} = 2.506.809$$

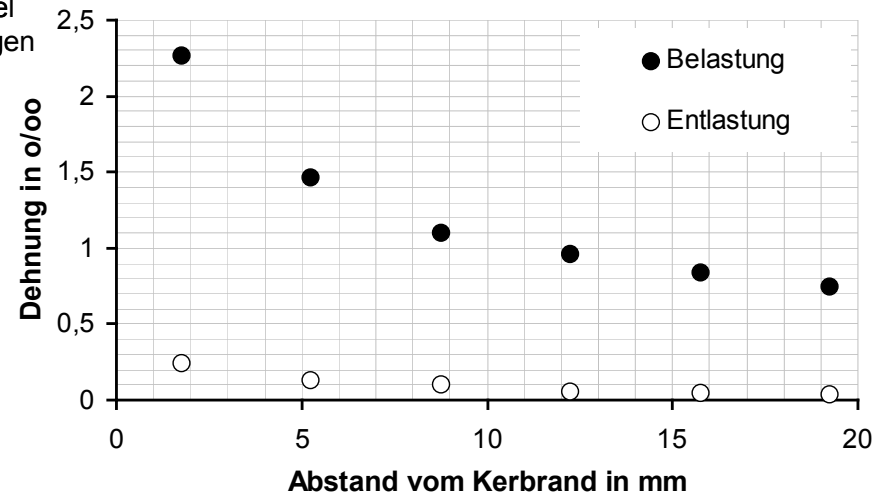
$$N_{50\%} = 1.736.866$$

$$N_{90\%} = 1.203.404$$

$$T_N = 1 : 2,08$$

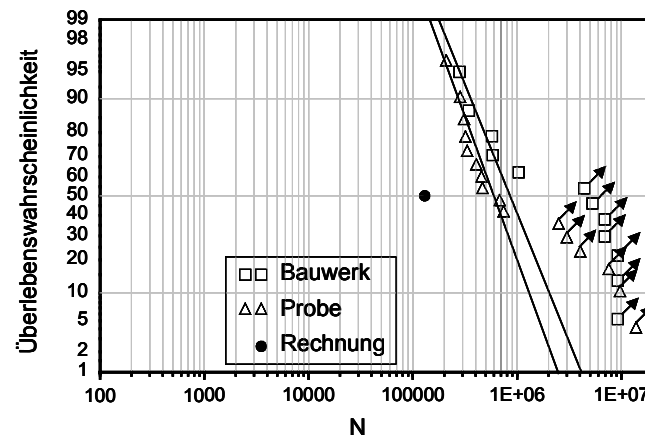


im ersten Lastwechsel
gemessene Dehnungen



BAUWERK		
$F_o = -10 \text{ kN} / F_u = -260 \text{ kN}$		
Träger Nr. (Charge)	Blechdicke in mm	N Anriss
T32(II)	10,5	1.030.000
T27(II)	10,5	582.967
T35(III)	10,5	572.936
T35(III)	10,5	345.000
T27(II)	10,6	280.000

7 x Durchläufer



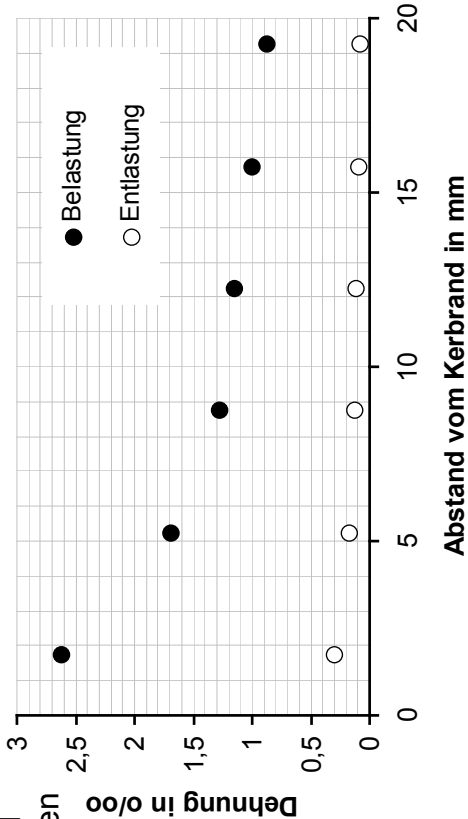
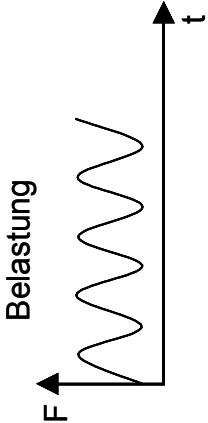
$$\begin{aligned}
 N_{10\%} &= 2.000.000 \\
 N_{50\%} &= 810.000 \\
 N_{90\%} &= 330.000 \\
 T_N &= 1:6,06
 \end{aligned}$$

PROBE		
$F_o = 110 \text{ kN} / F_u = 5 \text{ kN}$		
Probe (Charge)	Blechdicke in mm	N Anriss
G8(II)	10,4	741.162
G3(II)	10,2	678.520
G7(II)	10,4	464.368
G6(II)	10,4	454.132
G4(II)	10,2	405.605
G5(II)	10,3	331.784
G12(II)	10,4	318.650
G10(II)	10,4	310.383
G9(II)	10,4	283.899
L2(III)	10,6	208.560

6 x Durchläufer

$$\begin{aligned}
 N_{10\%} &= 1.100.000 \\
 N_{50\%} &= 600.000 \\
 N_{90\%} &= 280.000 \\
 T_N &= 1:3,93
 \end{aligned}$$

im ersten Lastwechsel
gemessene Dehnungen

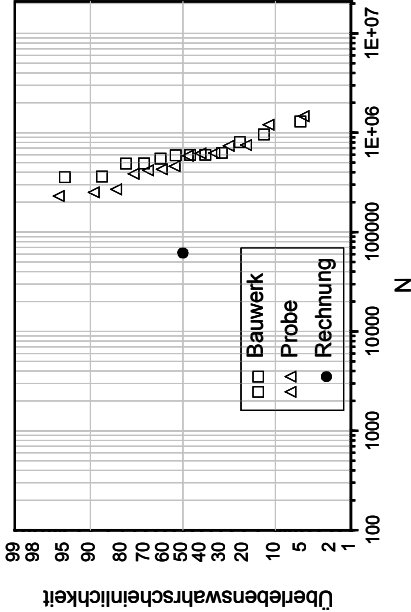


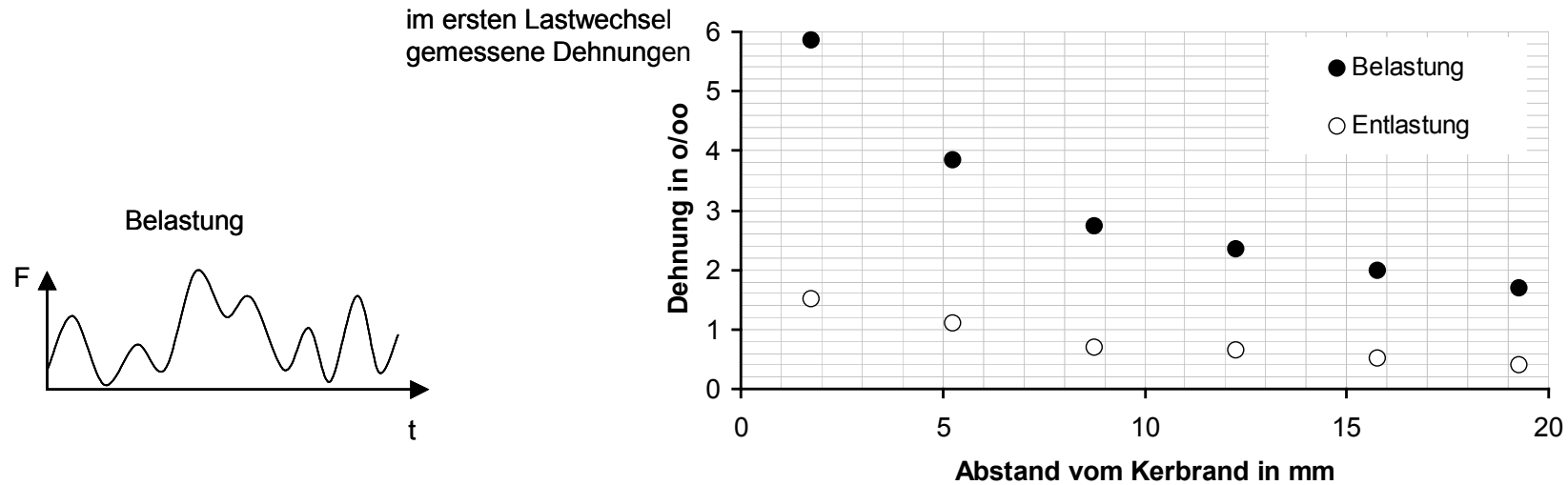
BAUWERK $F_o = -10 \text{ kN} / F_u = -300 \text{ kN}$			
Träger Nr. (Charge)	Blechdicke in mm	N	Anriss
T43(IV)	10,2	1.300.000	
T43(IV)	10,2	960.566	
T46(IV)	10,2	805.000	
T42(IV)	10,2	626.375	
T42(IV)	10,2	598.956	
T39(III)	10,4	598.416	
T36(III)	10,5	593.256	
T39(III)	10,5	549.531	
T47(IV)	10,4	491.840	
T36(III)	10,5	489.541	
T46(IV)	10,2	362.557	
T47(IV)	10,2	357.265	

$N_{10\%} = 969.632$
 $N_{50\%} = 602.642$
 $N_{90\%} = 374.552$
 $T_N = 1 : 2,59$

PROBE $F_o = 123 \text{ kN} / F_u = 5 \text{ kN}$			
Probe (Charge)	Blechdicke in mm	N	Anriss
O5(IV)	10,2	1.466.661	
N1(IV)	10,2	1.204.033	
N2(IV)	10,2	751.941	
O8(IV)	10,3	738.028	
O3(IV)	10,1	624.326	
O1(IV)	10,3	620.111	
O6(IV)	10,3	587.039	
N7(IV)	10,1	460.206	
N4(IV)	10,1	428.557	
O4(IV)	10,2	418.575	
N8(IV)	10,1	386.007	
N5(IV)	10,1	269.303	
O7(IV)	10,3	251.254	
N3(IV)	10,1	230.471	

$N_{10\%} = 963.799$
 $N_{50\%} = 521.715$
 $N_{90\%} = 282.411$
 $T_N = 1 : 3,41$





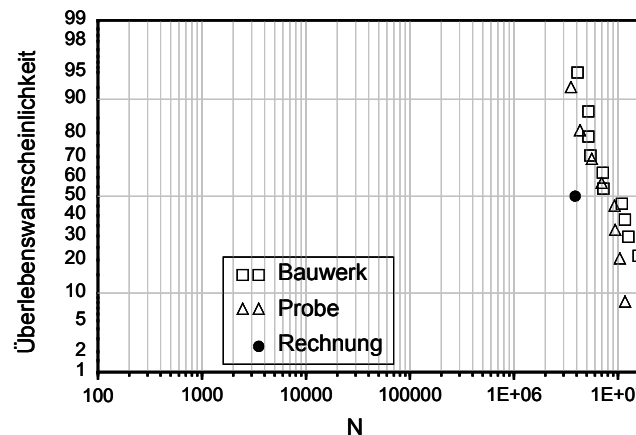
BAUWERK		
$F_{\max} = -500 \text{ kN} / F_{\min} = -15 \text{ kN}$		
Träger Nr. (Charge)	Blechdicke in mm	N_{rev} Anriss
T41(II)	10,5	19.018.460
T40(II)	10,4	17.120.690
T41(III)	10,6	15.794.190
T37(III)	10,6	12.540.000
T37(III)	10,6	11662250
T40(III)	10,5	10903330
T38(II)	10,3	7225530
T30(II)	10,3	7148914
T29(II)	10,5	5422690
T29(II)	10,4	5199770
T38(II)	10,5	5195310
T30(II)	10,3	4083184

$$N_{10\%} = 17.573.135$$

$$N_{50\%} = 8.919.033$$

$$N_{90\%} = 4.526.747$$

$$T_N = 1 : 3,88$$



PROBE		
$F_{\max} = 210 \text{ kN} / F_{\min} = 1 \text{ kN}$		
Probe (Charge)	Blechdicke in mm	N_{rev} Anriss
H1(II)	10,2	11.688.081
H2(II)	10,2	10.388.054
L5(III)	10,4	9.384.400
L4(III)	10,4	9.251.306
H3(II)	10,3	6.960.763
H4(II)	10,3	5.588.332
G11(II)	10,3	4.310.060
G13(II)	10,3	3.527.235

$$N_{10\%} = 12.368.450$$

$$N_{50\%} = 7.068.756$$

$$N_{90\%} = 4.039.900$$

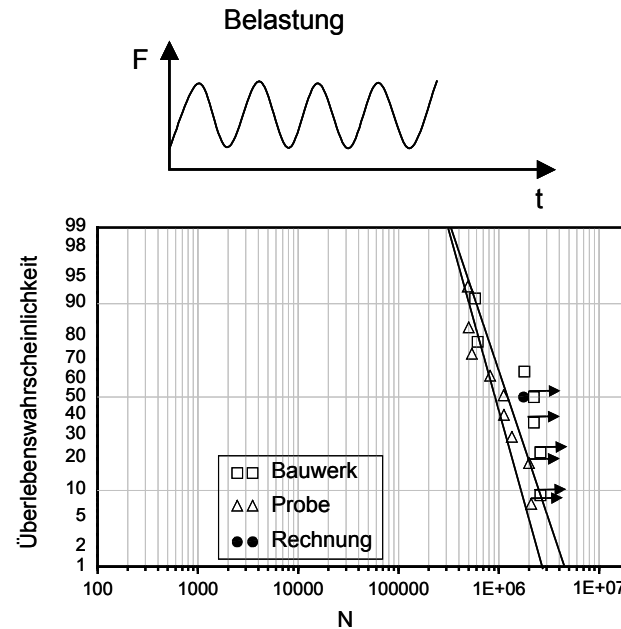
$$T_N = 1 : 3,06$$

BAUWERK	
Nahtbreite = 100 mm	
$F_o = -10 \text{ kN} / F_u = -300 \text{ kN}$	

Träger Nr. (Charge)	N Anriss
T22(II)	616.536
T25(II)	579.030
T46(IV)	1.817.465

4 x Durchläufer

$N_{10\%} = 2.400.000$
 $N_{50\%} = 1.200.000$
 $N_{90\%} = 600.000$
 $T_N = 1:4,00$



PROBE	
Nahtbreite = 60 mm	
$F_o = 336 \text{ kN} / F_u = 159,6 \text{ kN}$	
$\kappa = 0,475$	
$\sigma_a = 105 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_m = 295 \text{ N/mm}^2$	

Probe (Charge)	N Anriss
4b(II)	490.009
1b(II)	500.000
9b(II)	537.994
5a(II)	818.706
10.2(II)	1.116.050
2.4(II)	1.122.750
8b(II)	1.347.580

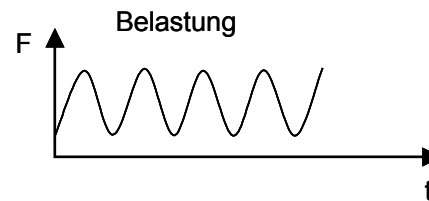
2 x Durchläufer

$N_{10\%} = 1.800.000$
 $N_{50\%} = 900.000$
 $N_{90\%} = 480.000$
 $T_N = 1:3,75$

BAUWERK	
Nahtbreite = 120 mm	
$F_o = -10 \text{ kN} / F_u = -260 \text{ kN}$	

Träger Nr. (Charge)	N Anriss
T31(II)	5.490.378

4 x Durchläufer



PROBE	
$\kappa = 0,475$	
$\sigma_a = 79,4 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_m = 223,1 \text{ N/mm}^2$	

	Belastung	Testkörper	N	
			1. Anriss	2. Anriss
Wöhler IIa	Einstufig $F_u = -260 \text{ kN}$ $F_o = -10 \text{ kN}$	T26	3.595.999	3.747.680
		T27	689.295	4.068.642
		T31	2.400.000	3.000.000
		T32	430.239	2.805.868
		T33	577.899	2.259.180
		T34	465.197	973.500
		T35	389.550	2.740.247

	Belastung	Testkörper	N	
			1. Anriss	2. Anriss
Wöhler IIb	Einstufig $F_u = -300 \text{ kN}$ $F_o = -10 \text{ kN}$	T22	307.000	316.976
		T25	270.000	277.130
		T36	675.001	1.250.025
		T39	616.288	823.465
		T42	154.098	322.006
		T43	261.306	292.930
		T46	350.049	839.530
		T47	254.286	570.107

	Belastung	Testkörper	N_{rev}	
			1. Anriss	2. Anriss
Random II	Random 16 stufig $F_{min} = -500 \text{ kN}$ $F_{max} = -15 \text{ kN}$	T29	4.394.440	13.117.590
		T30	4.397.102	8.823.755
		T37	3.665.610	8.049.850
		T38	3.558.410	7.972.767
		T40	1.844.206	6.547.333
		T41	4.107.183	4.751.447
		T23	2.651.083	3.033.335
		T24A	6.129.037	6.615.441
		T24B	3.696.477	4.822.802

	Belastung	N			N		
		Testkörper	1. Anriss	Bruchbild	Testkörper	2. Anriss	Bruchbild
Wöhler IIa	Einstufig $F_u = -260 \text{ kN}$ $F_o = -10 \text{ kN}$	T26	3.595.999	b	T27	4.068.642	n
		T31	2.400.000	nb	T26	3.747.680	n
		T27	689.295	b	T31	3.000.000	b
		T33	577.899	b	T32	2.805.868	n
		T34	465.197	b	T35	2.740.247	n
		T32	430.239	b	T33	2.259.180	nb
		T35	389.550	b	T34	973.500	b
	Belastung	N			N		
		Testkörper	1. Anriss	Bruchbild	Testkörper	2. Anriss	Bruchbild
Wöhler IIb	Einstufig $F_u = -300 \text{ kN}$ $F_o = -10 \text{ kN}$	T36	675.001	b	T36	1.250.025	n
		T39	616.288	n	T46	839.530	n
		T46	350.049	b	T39	823.465	nb
		T22	307.000	n	T47	570.107	n
		T25	270.000	n	T42	322.006	n
		T43	261.306	n	T22	316.976	n
		T47	254.286	b	T43	292.930	b
		T42	154.098	n	T25	277.130	n
	Belastung	N_{rev}			N_{rev}		
		Testkörper	1. Anriss	Bruchbild	Testkörper	2. Anriss	Bruchbild
Random II	Random 16 stufig $F_{min} = -500 \text{ kN}$ $F_{max} = -15 \text{ kN}$	T24A	6.129.037	n	T29	13.117.590	nb
		T30	4.397.102	nb	T30	8.823.755	b
		T29	4.394.440	b	T37	8.049.850	n
		T41	4.107.183	n	T38	7.972.767	n
		T24B	3.696.477	n	T24A	6.615.441	n
		T37	3.665.610	n	T40	6.547.333	n
		T38	3.558.410	n	T24B	4.822.802	n
		T23	2.651.083	n	T41	4.751.447	n
		T40	1.844.206	b	T23	3.033.335	n

Anlage 5.25 Anrisslastwechselzahlen der Steifenanschlüsse nach Betrag sortiert. Bruchbilder vgl. Abb. 5.22.

Detail	Versuchsreihe	c (el. Übertragungsfaktor) [(N/mm ²)/kN]	Belastung [kN]	σ_{Hook} [N/mm ²]	N_{calc}	$N_{\text{EBW, 50\%}}$	$N_{\text{Probe, 50\%}}$
Aussparungsecke	LCF I	4,283	$F_u = -550$ $F_o = 0$	$\sigma_{H,o} = 2355$ $\sigma_{H,u} = 0$	563	673	863
	Wöhler I	4,283	$F_u = -105$ $F_o = -5$	$\sigma_{H,o} = 450$ $\sigma_{H,u} = 21$	833.600	495.376	539.132
	Random I	4,283	$F_{\min} = -309,5$ $F_{\max} = -5,5$	$\sigma_{H,\max} = 1326$ $\sigma_{H,\min} = 24$	2.644.000	1.065.091	1.736.866
	Wöhler II/a	2,395	$F_u = -260$ $F_o = -10$	$\sigma_{H,o} = 623$ $\sigma_{H,u} = 24$	124.400	810.000	600.000
	Wöhler II/b	2,395	$F_u = -300$ $F_o = -10$	$\sigma_{H,o} = 719$ $\sigma_{H,u} = 24$	59.310	602.642	521.715
	Random II	2,395	$F_{\min} = -516,2$ $F_{\max} = -1,2$	$\sigma_{H,\max} = 1236$ $\sigma_{H,\min} = -3$	3.702.000	8.919.033	7.068.756

Detail	Versuchsreihe	Kerbformzahl	σ_{Nenn} [N/mm ²]	σ_{Hook} [N/mm ²]	N_{calc}	$N_{\text{EBW, 50\%}}$	$N_{\text{Probe, 50\%}}$
Schweiß- verbindung	Wöhler II/b	$\alpha_k = 1,56$	$\sigma_{N,o} = 400$ $\sigma_{N,u} = 190$	$\sigma_{H,o} = 624$ $\sigma_{H,u} = 296$	1.667.000	1.200.000	900.000

Parameter der Dehnungswöhlerlinie und der ZSD-Kurve

$$\begin{aligned}
 \sigma'_f &= 1,5 \times 540 = 810 \text{ N/mm}^2 \\
 b &= -0,087 \\
 \epsilon'_f &= 0,59 \\
 c &= -0,58 \\
 n' &= 0,15 \\
 K' &= \sigma'_f / (\epsilon'_f)^{n'} = 877 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

Anlage 5.26 Verwendete Parameter zur Berechnung der Lebensdauer nach dem Kerbgrundkonzept. Bei den Random-Versuchsreihen beziehen sich die Spannungen auf die Grenzen der Randklassen (vgl. [Naub 99]). Die verwendete Korrelationstabelle ist in Anlage 5.27 dargestellt.

VON	1	73														
	2	446	1352													
	3	1050	3724	3160												
	4	918	4045	6148	230											
	5	1047	2838	3633	221	81										
	6	859	2696	2550	100	31	52									
	7	209	1575	2005	34	14	15	13								
	8	46	324	526	15	8	2	2	5							
	9	11	77	54	0	2	1	0	1							
	10	4	13	10	2	0	1	1								
	11	2	14	1		1										
	12	7	4	2												
	13	3	2	2												
	14	1		1												
	15	1														
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
		NACH														

Anlage 5.27 Korrelationstabelle der untersuchten Beanspruchung für die Randomtests

Lebenslauf

Persönliche Daten

Milad Mehdiانpour

Geboren am 14. Mai 1966 in Behshahr / Iran

ledig

Schulbildung

1973-1979 Grundschule in Teheran

1979-1985 Gymnasium im Landschulheim Schloss Ising / Deutschland

1985-1988 Gymnasium Pullach in München

Abschluss: Abitur

Hochschulbildung

1988-1994 Bauingenieurwesen an der Technischen Universität München

Vertiefungsfächer: Stahlbau, Wasserbau

Abschluss: Diplom-Ingenieur

1994 Schweißfachingenieur an der SLV München

Abschluss: European Welding Engineer (EWE)

Berufstätigkeit

Jan. 1994 – Sept. 1994

Freier Mitarbeiter des Ingenieurbüros Abelein - Dr. Jankowski
in München

Jan. 1995 – März 2002

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Stahlbau der
Technischen Universität Braunschweig

März 2002 – Okt. 2002

Freier Mitarbeiter der Ingenieursozietät Prof. Peil und Partner
in Braunschweig

seit Okt. 2002

Mitarbeiter der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung
in Berlin